



**Hugo Agostinho Ferreira Cabral**

[Licenciado em Engenharia Civil]

## **Ensaios de Arrancamento de Laminados Compósitos Aderentes a Superfícies de Betão**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia

**Orientador Científico:**

Professor Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva

**Júri**

Presidente: Prof. Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida

Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogal: Prof. Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



# **Ensaio de Arrancamento de Laminados Compósitos Aderentes a Superfícies de Betão**

**Hugo Agostinho Ferreira Cabral**

[Licenciado em Engenharia Civil]

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia

## **Orientador Científico:**

Professor Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva

## **Júri**

Presidente: Prof. Doutor João Carlos Gomes Rocha de Almeida

Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogal: Prof. Doutor Manuel Américo Gonçalves da Silva

**2012**



*Copyright* Hugo Cabral, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Resumo

O presente trabalho refere-se ao estudo do comportamento da ligação entre os materiais compósitos de polímeros reforçados com fibras e o betão. Estes materiais são utilizados para o reforço de elementos estruturais de betão e são colados com vários tipos de resinas. A ligação entre os materiais fica dependente de vários fatores que serão expostos no presente trabalho.

Após a aplicação dos materiais compósitos nos elementos estruturais de betão é necessário assegurar que a ligação entre os dois ficou bem realizada, existindo vários ensaios que se podem executar para testar o valor da aderência do reforço ao betão estrutural. Alguns destes métodos podem ser aplicados em obra pois são de rápida e fácil execução.

Neste trabalho fez-se uma pesquisa sobre os diferentes tipos de ensaios que se podem realizar para caracterizar a ligação betão-FRP. Analisou-se a literatura técnica existente sobre a temática e foram reunidos alguns exemplos de aplicação dos diferentes ensaios. Esses exemplos serão apresentados, descritos e criticados de forma a concluir sobre as vantagens e desvantagens de cada um.

Na aplicação de materiais compósitos em estruturas de betão é fundamental tratar a superfície do mesmo, oferecendo assim uma maior rugosidade e exposição dos agregados, com o objetivo de conseguir uma ligação resistente e desta forma obter o máximo proveito do reforço executado. Existem inúmeras formas de tratar uma superfície de betão, nomeadamente através de jatos de areia e de água, rebarbadora com disco de moagem, martelo de agulhas. A importância do estudo destes parâmetros levou a que neste trabalho fossem recriadas varias ligações betão/FRP diferentes.

Realizou-se ainda um trabalho experimental com o objetivo de estudar a diferença obtida em betões com agregados de diferentes tamanhos e a diferença entre os tratamentos de superfície. Para tal recorreu-se a um dos métodos mais utilizados em obra, o ensaio de arrancamento direto. Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Foram utilizados três tipos de betão diferentes, com a particularidade de entre eles apenas se alterar as dimensões do agregado, sendo com cada um betonados 3 cubos e uma lajeta. Os cubos foram utilizados para caracterizar os betões quanto à sua capacidade resistente à compressão aos 28 dias.

Em cada lajeta foram utilizados dois dos tratamentos de superfície mencionados, metade com jacto de areia e metade com rebarbadora.

O material de reforço utilizado foi um polímero reforçado com fibras de vidro e realizou-se o ensaio de arrancamento direto.

Concluiu-se que a rotura se dá muitas vezes pelo betão. No entanto para os agregados maiores esta rotura tende a ocorrer pela interface betão-compósito.

A ligação entre os polímeros reforçados com fibras e o betão pode ser analisada a vários níveis: ligação química e ligação física. A resina epoxídica vai penetrar pelas irregularidades da superfície e assim criar pequenos sistemas de ancoragem. Esta ligação vai ser melhorada com adequado aumento da rugosidade da superfície do betão. No entanto chegou-se à conclusão que um aumento muito grande da rugosidade obtido por meios muito agressivos levará à diminuição da capacidade resistente superficial do betão e por consequência a diminuição da tensão de arrancamento.



# Abstract

The present work refers to the study of the behavior of the connection between the fiber reinforced polymers and concrete. These materials are used for the reinforcement of concrete structural elements and are bonded with different types of resin. The connection between these materials depends on several factors that will be exposed in this work.

After the application of the composite material in structural elements of concrete it is necessary to ensure that the connection between the reinforcement and the concrete was properly carried out. There are several tests that can be performed to analyze the value of adhesion of the reinforcement to the concrete structure. Some of these methods can be applied in site because they are quick and easy to perform.

In this work a research was made on the different types of tests that can be done to characterize the binding concrete - FRP. I did a review of the technical literature on the subject including some applications of the tests. These examples will be presented, described and criticized in order to conclude on the advantages and disadvantages of each.

I did an experimental work in order to study the difference of adhesion obtained for concrete with aggregates of different sizes and for different surface treatments, for one of the most used methods on the site, the Pull-Off test. This work was developed in the Structures Laboratory, Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nova University of Lisbon.

For the application of composite materials in concrete structures, it is essential the preparation of the surface, thus offering greater roughness and aggregate exposure, in order to get a durable bond properly and thus get the most out of the reinforcement executed. With this objective there are numerous ways to prepare a concrete surface, including through jets of sand and water, grinding disc with angle grinder and hammer needle. The importance of these parameters led to this work in which several different links concrete / FRP were recreated.

Three different types of concrete were used with the peculiarity that among them there is only change of the size of the aggregates. Three cubes were used to characterize the concrete for their resistance to compression after 28 days.

In each slab were also realized two of the surface treatments mentioned, namely half with sand blasting and half with a grinder.

The reinforcement material used was a composite made of epoxy resin with glass fiber (GFRP) and Pull-Off test were performed.

It was concluded that the breakage often takes place at the substrate and does not occur by the interface-mixed composite. However, for larger aggregates, that breakage tends to occur on this zone.

The behavior of FRP adherent on concrete depends on various connection types: chemical bonding and physical bonding. The epoxy resin will penetrate the surface irregularities and thereby create small anchoring systems. This connection will be improved with appropriate increase of the surface roughness of the concrete. However a very large increase in roughness obtained by means of aggressive actions leads to the decrease of the strength of the concrete surface and thus the decrease of pull-off strength.

## Palavras-chave

Fibras de vidro; Resina epoxídica; Reforço de estruturas; Ensaio de arrancamento direto; Ensaio de corte direto; Ensaio de torção; Ensaio de laminação; Aderência.

## Keywords

Fiber Glass; Epoxy resin; Structural reinforcement; *Pull-Off test*; *Shear test*; *Torsion test*; *Peel test*; Bond.



# Agradecimentos

A concretização deste trabalho só poderia ser possível com o apoio de algumas pessoas e instituições e o culminar deste obriga-me a reconhecer todo o apoio material e humano que me foi dado. Não posso então deixar de agradecer e de reconhecer a minha admiração e respeito por todos eles.

Agradeço em especial ao meu orientador científico, o Professor Manuel Américo Gonçalves da Silva, por todo o apoio prestado mesmo em momentos mais complicados. A disponibilidade apresentada na transmissão de conhecimentos, nas revisões rigorosas dos temas desenvolvidos, na transmissão de artigos e material de trabalho e também na resolução de problemas em torno do trabalho laboratorial merecem o meu mais sincero agradecimento.

Ao Engenheiro David Lucas e ao Professor Hugo Emanuel Biscaia pela ajuda fornecida na realização das atividades experimentais, pelo fornecimento de artigos relacionados com a problemática e ainda por alguns concelhos fornecidos sobre o tema em questão.

Ao funcionário do laboratório Jorge Silvério pela valiosa ajuda prestada na elaboração dos provetes e no desenvolvimento dos envelhecimentos realizados.

Às funcionárias do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, D.<sup>a</sup> Maria da Luz e Carla Figueiredo, o meu agradecimento pelo acolhimento, carinho e colaboração prestadas.

A todos os meus amigos e colegas de faculdade que me acompanharam durante estes 5 anos. Obrigado pela amizade, apoio e incentivo em todos os momentos mais complicados.

Por último, um agradecimento muito especial aos meus pais, irmãos e avós pelo incondicional apoio, carinho e compreensão. A minha mãe através de todo o carinho e preocupação e o meu pai por sempre ter sido um exemplo a seguir são sem dúvida aquelas pessoas a quem mais tenho de agradecer. Obrigado por me proporcionarem o melhor durante todos estes anos.

*A todos aqui deixo a minha profunda gratidão.*



# Índice de texto

Resumo.....	v
Abstract .....	vii
Palavras-chave.....	ix
Keywords .....	ix
Agradecimentos.....	xi
Índice de texto .....	xiii
Índice de Figuras .....	xvii
Índice de Tabelas.....	xxi
Simbologia .....	xxiii
<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 - Aspetos gerais .....	1
1.2 - Objetivo do trabalho de investigação .....	4
1.3 - Organização da dissertação .....	5
<b>Capítulo 2 - Estado da arte .....</b>	<b>7</b>
2.1 - Aspetos gerais .....	7
2.2 - Materiais.....	9
2.2.1 - Fibras.....	9
<i>Fibras de vidro</i> .....	10
2.2.2 - Resina.....	11
2.2.3 - Materiais compósitos de FRP.....	14
2.2.4 - Betão .....	16
2.3 - Importância do Tratamento de Superfície .....	17
2.4 - Métodos de tratamento de superfície .....	21
2.4.1 - Jacto de areia .....	21
2.4.2 - Rebarbadora com disco abrasivo.....	22
2.5 - Envelhecimento e Degradação Ambiental .....	23

2.5.1 - Influência da temperatura.....	25
2.5.2 - Influência da humidade .....	27
2.5.3 - Influência dos cloretos e do ciclo de marés.....	28
2.6 - Ensaios de Arrancamento de Compósitos de FRP .....	29
2.6.1 - Ensaio de torsão .....	30
2.6.2 - Ensaio de Corte Direto .....	31
2.6.3 - <i>Peel test</i> .....	31
2.6.4 - Ensaio de arrancamento direto ( <i>Pull-Off test</i> ).....	33
<i>Descrição do ensaio de arrancamento direto</i> .....	33
<i>Modos de rotura</i> .....	36
<b>Capítulo 3 - Trabalhos experimentais analisados .....</b>	<b>39</b>
3.1.1 - Toutanji e Ortiz (2001).....	40
3.1.2 - Au et al (2005) .....	41
3.1.3 - Eketel (2005).....	44
3.1.4 - Biscaia (2006) .....	46
3.1.5 - Myers et al (2007) .....	47
3.1.6 - Bissonnette et al (2009).....	50
3.1.7 - Benzarti et al (2010).....	53
<b>Capítulo 4 - Aplicação Experimental .....</b>	<b>59</b>
4.1 - Introdução .....	59
4.2 - Caracterização dos materiais.....	60
4.2.1 - Betões utilizados .....	60
4.2.2 - Compósito GFRP utilizado .....	64
<i>Cristalização da resina epoxídica</i> .....	67
4.3 - Caracterização da atividade experimental.....	68
4.3.1 - Betonagem das lajetas .....	68
4.3.2 - Tratamento da superfície com jacto de areia e rebarbadora .....	70
4.3.3 - Análise da rugosidade da superfície.....	72



4.3.4 - Colagem do compósito de fibras de vidro.....	74
4.3.5 - Envelhecimento acelerado com ciclos de marés .....	76
4.3.6 - Ensaio de aderência .....	79
4.4 - Resultados experimentais.....	82
4.4.1 - Descrição geral.....	82
4.4.2 - Rugosidade da superfície .....	82
4.4.3 - Ensaio De arrancamento direto.....	84
4.4.3.1 -Ensaio sem envelhecimento .....	84
4.4.3.2 -Ensaio às 1000 horas - Envelhecimento por ciclos de marés .....	88
4.4.3.3 -Ensaio às 2000 horas - Envelhecimento com ciclos seco-molhado .....	89
<b>Capítulo 5 - Interpretação de resultados .....</b>	<b>91</b>
5.1 - Introdução .....	91
5.2 - Ensaio de compressão.....	91
5.3 - Rugosidade.....	92
5.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento direto .....	92
5.4.1 - Ensaio sem envelhecimento.....	92
5.4.2 - Evolução dos ensaios com o envelhecimento .....	98
<b>Capítulo 6 - Conclusões e Recomendações.....</b>	<b>101</b>
Bibliografia .....	105



# Índice de Figuras

Figura 1.1. Evolução da utilização da fibra de carbono, em função do seu preço, da sua produção e campo de aplicação.....	3
Figura 1.2- Diferentes tipos de fibra .....	3
Figura 1.3- Reforço com materiais compósitos.....	4
Figura 2.1- Reforço dos elementos escultóricos decorativos (edifício Palladium, Porto) com GFRP .....	8
Figura 2.2. Diagrama tensão-extensão de diferentes tipos de fibras, do aço A500 e de cordões de pré-esforço.....	10
Figura 2.3. Propriedades do aço, do alumínio e dos materiais compósitos .....	14
Figura 2.4 – Processo de pultrusão.....	15
Figura 2.5- Tecido de fibra de vidro (à esquerda) e laminado de fibra de vidro (à direita). .....	16
Figura 2.6- Irregularidades que provocam forças de desvio nos laminados de FRP.....	18
Figura 2.7 – Arredondamento de aristas de betão com uma rebarbadora. ....	19
Figura 2.8 – Operário trata parede de betão com jacto de areia. ....	21
Figura 2.9 – Temperatura mínima e máxima ao longo do mês de Janeiro de 2012, Bragança ..	24
Figura 2.10 – Efeitos da temperatura no módulo de ganho ( $E'$ ) e no coeficiente de perda ( $\tan \delta$ ). ....	26
Figura 2.11 – Efeitos da humidade no comportamento de uma resina . ....	28
Figura 2.12. Aplicação de momento utilizando a chave de torção.....	30
Figura 2.13. Ensaio de corte direto .....	31
Figura 2.14. Ensaio de corte duplo.....	31
Figura 2.15. <i>Peel-test</i> .....	32
Figura 2.16. <i>Peel-test</i> com rolo deslizante .....	32
Figura 2.17: Dinamómetro para ensaio de aderência .....	34
Figura 2.18 - Procedimento do ensaio de arrancamento direto .....	35
Figura 2.19 - Diferentes modos de rotura num ensaio de arrancamento direto.....	37
Figura 3.1- Esquema dos provetes de ensaio de corte duplo.....	40
Figura 3.2- Comparação entre a carga de rotura obtida para tratamento com jacto de água e com rebarbadora .....	41
Figura 3.3. Provetes utilizados no ensaio de Peel e no ensaio de corte direto por Au et al .....	42

Figura 3.4. Curvas de força aplicada vs. deslocamento obtidas por Au et al .....	43
Figura 3.5. Curvas de força aplicada vs. deslocamento obtidas no ensaio de corte simples por Au et al....	44
Figura 3.6. Esquema dos provetes reforçados com CFRP utilizados para os ensaios de superfície. ....	45
Figura 3.7: Modelo de ensaio utilizado por Myers et al, imagem adaptada de Myers et al. ....	48
Figura 3.8: Interface betão-FRP após o ensaio de corte com diferentes rugosidades. ....	48
Figura 3.9: Modos típicos de reforço ao esforço transversal. ....	49
Figura 3.10 – Resultados da rugosidade obtida depois da preparação da superfície com diferentes métodos. ....	50
Figura 3.11 – Esclerómetro .....	51
Figura 3.12 - Resultados obtidos com o esclerómetro, para vários tipos de tratamento de superfície ....	52
Figura 3.13 - Resultados dos testes de arrancamento direto obtidos para diferentes tratamentos de superfície. ....	52
Figura 3.14 - Resultados dos ensaios de arrancamento direto em função do tipo de tratamento de superfície. ....	53
Figura 3.15 – Provetes criados por Benzarti para ensaios de corte, arrancamento direto e compressão. ....	54
Figura 3.16 – Absorção de humidade ao longo do envelhecimento (à esquerda), evolução do $T_g$ ao longo do envelhecimento (à direita). ....	55
Figura 3.17 – Evolução da tensão de arrancamento direto com o envelhecimento.....	55
Figura 3.18 - Evolução dos modos de rotura por Arrancamento direto. Provetes tipo S1 .....	56
Figura 3.19 - Evolução dos modos de rotura por Arrancamento direto. Provetes tipo S2 .....	56
Figura 3.20 – Evolução das tensões de corte ao longo do envelhecimento .....	57
Figura 3.21 - Evolução dos modos de rotura por corte. Provetes tipo S1 .....	57
Figura 3.22 - Evolução dos modos de rotura por corte. Provetes tipo S2 .....	58
Figura 4.1: Curva granulométrica da areia .....	60
Figura 4.2: Curva granulométrica da brita .....	61
Figura 4.3: Máquina de compressão uniaxial (LNEC).....	62
Figura 4.4: Disposição das fibras no tecido Tyfo® SEH-51 .....	64
Figura 4.5: Componentes da Tyfo® S Epoxy .....	65
Figura 4.6. Resina Epóxi cristalizada. ....	67
Figura 4.7: Moldes das lajetas e dos cubos após serem lubrificados. ....	69

Figura 4.8: Materiais constituintes do betão (à esquerda). Betoneira a misturar os materiais (à direita). ...	69
Figura 4.9: Vibração do betão .....	70
Figura 4.10: Equipamento de jacto de areia (direita) e rebarbadora (esquerda).....	71
Figura 4.11: Pormenor da superfície do betão antes (esquerda) e após o tratamento com jacto de areia (direita). ....	71
Figura 4.12: Diferente exposição do agregado com rebarbadora (esquerda) e com o jacto de areia (direita). ....	72
Figura 4.13: Equipamento para Ensaio da Mancha de Areia .....	73
Figura 4.14: Lajeta e tecido de fibra de vidro antes da colagem. ....	74
Figura 4.15: Impregnação e remoção dos excessos de resina num tecido de fibra de vidro. ....	75
Figura 4.16: Colagem das fibras. Remoção de todos os vazios e bolsas de ar.....	75
Figura 4.17: Colagem da segunda camada de fibra na lajeta LM. ....	76
Figura 4.18: Aspeto final das fibras coladas na lajeta .....	76
Figura 4.19: Sal utilizado .....	77
Figura 4.20: Tanques utilizados no envelhecimento acelerado.....	77
Figura 4.21: Disposição das lajetas no tanque B.....	78
Figura 4.22: Ciclos de ensaio (seco-molhado). ....	78
Figura 4.23: Condições durante o envelhecimento .....	79
Figura 4.24: Mapa dos arrancamentos .....	80
Figura 4.25: Esquema representativo da profundidade (Z) dos carotes. ....	80
Figura 4.26: Caroteadora (esquerda). Realização de um carote na lajeta (direita).....	81
Figura 4.27: Carote e pastilha De arrancamento direto.....	81
Figura 4.28: Método Volumétrico da Mancha de Areia, diferença entre Jacto de areia e Rebarbadora ....	83
Figura 4.29: Altura de areia ( $h_s$ ) obtida para as diferentes superfícies, utilizando o Ensaio Mancha de Areia, com classificação segundo DER-MG. ....	83
Figura 4.30: Evolução da tensão de arrancamento direto com a profundidade do carote na lajeta com brita pequena (LP) .....	85
Figura 4.31: Evolução da tensão de arrancamento direto com a profundidade do carote na lajeta com agregado médio (LM) .....	86
Figura 4.32 - Evolução da tensão de arrancamento direto com a profundidade do carote na lajeta com agregado grande (LG) .....	87

Figura 4.33: Resultados de arrancamento direto obtidos após 1000 horas de envelhecimento nas várias lajetas e para os dois tratamentos de superfície executados .....	89
Figura 4.34: Resultados de arrancamento direto obtidos após 2000 horas de envelhecimento nas várias lajetas e para os dois tratamentos de superfície executados .....	90
Figura 5.1: Evolução da tensão de arrancamento com a profundidade do carote. ....	93
Figura 5.2. Modo de rotura 1- Rotura pelo betão.....	94
Figura 5.3: Modo de rotura 2-Rotura parcial por corte no betão e descolagem na interface adesivo-betão..	94
Figura 5.4: Média da tensão de arrancamento obtida para cada um dos tratamentos de superfície.....	95
Figura 5.5: Diferença na tensão de arrancamento com a variação da dimensão da brita. ....	96
Figura 5.6: Modos de rotura ocorridos na lajeta com agregado pequeno (LP). ....	97
Figura 5.7: Modos de rotura ocorridos na lajeta com agregado médio (LM). ....	97
Figura 5.8: Modos de rotura ocorridos na lajeta com agregado grande (LG). ....	97
Figura 5.9: Superfície de rotura com grande percentagem de agregados lisos. ....	98
Figura 5.10: Evolução da tensão de arrancamento na lajeta com brita pequena (LP).....	98
Figura 5.11: Evolução da tensão de arrancamento na lajeta com brita média (LM).....	99
Figura 5.12: Evolução da tensão de arrancamento na lajeta com brita grande (LG). ....	100

# Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Propriedades aproximadas dos diferentes tipos de fibra de vidro .....	11
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas do adesivo tipo epoxídico, do aço e do betão.....	13
Tabela 2.3 – Valores permitidos para o desnivelamento da superfície do betão.....	18
Tabela 2.4 – Fator de redução ambiental para diferentes sistemas e FRP e exposição ambiental. ....	25
Tabela 3.1. Propriedades do Sistema M e do Sistema T. ....	45
Tabela 3.2 – Resultados obtidos em ensaios de arrancamento direto. ....	47
Tabela 3.3 – Propriedades dos sistemas de FRP adotados por Benzarti et. al. ....	53
Tabela 4.1- Quantidade de material por metro cubico de betão.....	61
Tabela 4.2: Tensão de compressão dos cubos aos 28 dias. ....	62
Tabela 4.3: Características dos betões aos 28 dias, segundo o EC2.....	63
Tabela 4.4: Propriedades das fibras Tyfo <sup>®</sup> SEH-51 .....	64
Tabela 4.5: Propriedades da resina Tyfo <sup>®</sup> S Epoxy .....	65
Tabela 4.6: Propriedades do compósito utilizado .....	66
Tabela 4.7: Descrição das lajetas betonadas. ....	68
Tabela 4.8: Caracterização da Rugosidade segundo a DER-MG.....	73
Tabela 4.9 - Valores da tensão de arrancamento direto às 0 horas na lajeta com brita pequena (LP) ....	84
Tabela 4.10 - Valores da tensão de arrancamento direto às 0 horas na lajeta com brita média (LM).....	86
Tabela 4.11 - Valores da tensão de arrancamento direto às 0 horas na lajeta com brita grande (LG) ....	87
Tabela 4.12: Resultados obtidos pelo ensaio de arrancamento direto às 1000 horas .....	88
Tabela 4.13: Resultados obtidos pelo ensaio de arrancamento direto às 2000 horas .....	89





# Simbologia

## Notações escalares latinas

$A_{col}$	- Área de colagem do GFRP
$A_f$	- Área da secção transversal do GFRP
$A_m$	- Área média medida no Método da Mancha de Areia
$A_p$	- Área de colagem da pastilha do ensaio de arrancamento direto
$C_E$	- Fator de redução ambiental sugerido pelo ACI
$d_{méd}$	- Diâmetro médio medido no Método da Mancha de Areia
$e_g$	- Espessura da fibra de vidro
$E_{cm}$	- Módulo de elasticidade secante do betão
$E_f$	- Módulo de elasticidade do compósito de FRP
$E_g$	- Módulo de Elasticidade da fibra de vidro
$E_r$	- Módulo de Elasticidade da resina epoxídica
$f_c$	- Tensão de rotura à compressão de provetes cilíndricos de betão
$f_{c,cube}$	- Tensão de rotura à compressão de provetes cúbicos de betão
$f_{ck}$	- Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade para provetes cilíndricos
$f_{ck,cube}$	- Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 dias de idade para provetes cúbicos
$f_{cm}$	- Valor medio da tensão de rotura do betão à compressão
$f_{cm,cube}$	- Tensão de rotura à compressão de provetes cúbicos de betão
$f_{ctm}$	- Tensão de rotura à tração média do betão
$f_{ct,p}$	- Tensão de tração perpendicular à ligação betão-material obtido no ensaio de arrancamento direto

$f_{ctm,p}$	- Valor médio da resistência à tração perpendicular à ligação betão-material obtido no ensaio de arrancamento direto
$f_{fu}$	- Tensão última de tração de FRP
$F_t$	- Força de tração obtida pelo ensaio de arrancamento direto
$h_s$	- Altura de areia no Método da Mancha de Areia
$T$	- Temperatura
$T_C$	- Temperatura crítica acima da qual se inicia a redução do módulo de elasticidade do polímero
$T_g$	- Temperatura de transição vítrea
$T_{go}$	- Temperatura de transição vítrea - seco
$T_{gw}$	- Temperatura de transição vítrea - húmido
$T_r$	- Força registada pela chave de torção
$V_s$	- Volume de areia utilizado no Método da Mancha de Areia

## Notações escalares gregas

$\epsilon_{fu}$	- Extensão ultima no compósito de FRP
$\epsilon_g$	- Extensão de rotura à tração da fibra de vidro
$\epsilon_r$	- Extensão de rotura à tração da resina epoxídica
$\gamma_g$	- Peso por metro quadrado de fibra de vidro
$\rho_g$	- Densidade da fibra de vidro
$\sigma_g$	- Tensão de rotura à tração da fibra de vidro
$\sigma_r$	- Tensão de rotura à tração da resina epoxídica
$\tau$	- Tensão de aderência registada pelo ensaio de torção

## **Abreviaturas**

FRP	- Fiber Reinforced Polymer
AFRP	- Aramid Fiber Reinforced Polymer
GFRP	- Glass Fiber Reinforced Polymer
CFRP	- Carbon Fiber Reinforced Polymer
UV	- Ultra Violeta

## **Siglas**

DEC	- Departamento de Engenharia Civil
FCT	- Faculdade de Ciências e Tecnologias
UNL	- Universidade Nova de Lisboa
LNEC	- Laboratório Nacional de Engenharia Civil
ACI	- American Concrete Institute
fib	- Federation Internationale du Beton
DER-MG	- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais
ASTM	- American Society for Testing and Materials

## Provetes experimentais

P.i	- Cubo nº "i" da serie de cubos tipo P (betão produzido com agregado grosso compreendido entre 4,6 mm e 6,8 mm)
M.i	- Cubo nº "i" da serie de cubos tipo M (betão produzido com agregado grosso compreendido entre 6,8 mm e 12,7 mm)
G.i	- Cubo nº "i" da serie de cubos tipo G (betão feitos com agregado grosso superior a 12,7 mm)
LP	- Lajeta de betão produzido com agregado grosso compreendido entre 4,6 mm e 6,8 mm
LM	- Lajeta de betão produzido com agregado grosso compreendido entre 6,8 mm e 12,7 mm
LG	- Lajeta de betão produzido com agregado grosso superior a 12,7 mm
LP-R	- LP com a superfície do betão tratada a Rebarbadora
LP-JA	- LP com a superfície do betão tratada a Jato de Areia
LM-R	- LM com a superfície do betão tratada a Rebarbadora
LM-JA	- LM com a superfície do betão tratada a Jato de Areia
LM-G	- LG com a superfície do betão tratada a Rebarbadora
LM-JA	- LG com a superfície do betão tratada a Jato de Areia

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 - Aspetos gerais

Ao longo do último século, a construção em betão armado, assumiu muita importância, em especial após a segunda guerra mundial, quando se começaram a construir estruturas cada vez mais esbeltas [44]. Atualmente muitas das estruturas existentes começam a atingir os períodos de vida inicialmente previstos e estados de degradação que podem tornar a sua utilização desaconselhável. Mas não são só as estruturas mais antigas que começam a apresentar problemas. Existem várias causas associadas aos danos de uma estrutura, o seu período de vida, acidentes, sismos, condições atmosféricas adversas, má construção e até a má utilização da mesma [54]. Todos estes motivos podem levar a que seja necessária uma intervenção, de forma a corrigir os problemas e tornar novamente a estrutura funcional.

No entanto as intervenções nas estruturas não ficam resumidas aos casos em que estas se apresentam degradadas e disfuncionais. Com o passar dos anos pode surgir a necessidade de alterar o tipo de função de um edifício, podendo ou não este ficar submetido a diferentes tipos de sobrecargas e por vezes cargas permanentes, tendo também de respeitar diferentes normativas [12 e 44]. Existe ainda a possibilidade de nos edifícios ser necessária uma alteração do esquema estrutural, ou seja, eliminar alguns elementos estruturais passando a ser necessário o reforço dos restantes elementos.

No sentido de satisfazer as necessidades referidas anteriormente, começaram a surgir com o passar dos anos, várias técnicas e vários tipos de materiais para reparação e reforço de estruturas.

Atualmente existem inúmeras formas de reforçar e reparar estruturas em betão armado entre as quais se destacam: encamisamento por betão, ou seja, são adicionadas armaduras protegidas por uma camada de betão, aumentando assim a capacidade resistente do elemento mas aumentando substancialmente o seu peso próprio; através de perfis metálicos que são adicionados à estrutura; por pré-esforço; chapas de aço que são coladas com resina epoxídica ao betão, e por vezes ainda *pregadas* com buchas metálicas; e mais recentemente através da utilização de materiais compósitos [54].

A adição de chapas metálicas coladas aos elementos estruturais tem sido considerada como uma das melhores técnicas de reforço, pois permite um aumento significativo da capacidade resistente dos elementos, sendo ainda um método simples, económico, e que não provoca um aumento significativo das dimensões do elemento. No entanto esta técnica apresenta alguns problemas, e o elevado peso das chapas metálicas pode conduzir a problemas de transporte e de manipulação. Mas o principal problema desta técnica é o facto de começar a surgir corrosão, nomeadamente na interface entre as chapas e o adesivo, corrosão esta que compromete a ligação entre o elemento estrutural e o reforço e que não é passível de ser detetada com uma simples inspeção de rotina [23].

Com o objetivo de anular os problemas referidos, com a necessidade crescente de apostar em estruturas cada vez mais esbeltas e arrojadas [44] e com o crescimento do mercado dos materiais compósitos que inicialmente eram apenas utilizados no ramo militar e da aeronáutica, começou a aplicar-se estes materiais na área da construção. Por exemplo, a fibra de carbono, tal como se pode ver na Figura 1.1, tem sido adaptada ao longo dos anos a novos mercados, enquanto o seu preço tem diminuído consideravelmente.

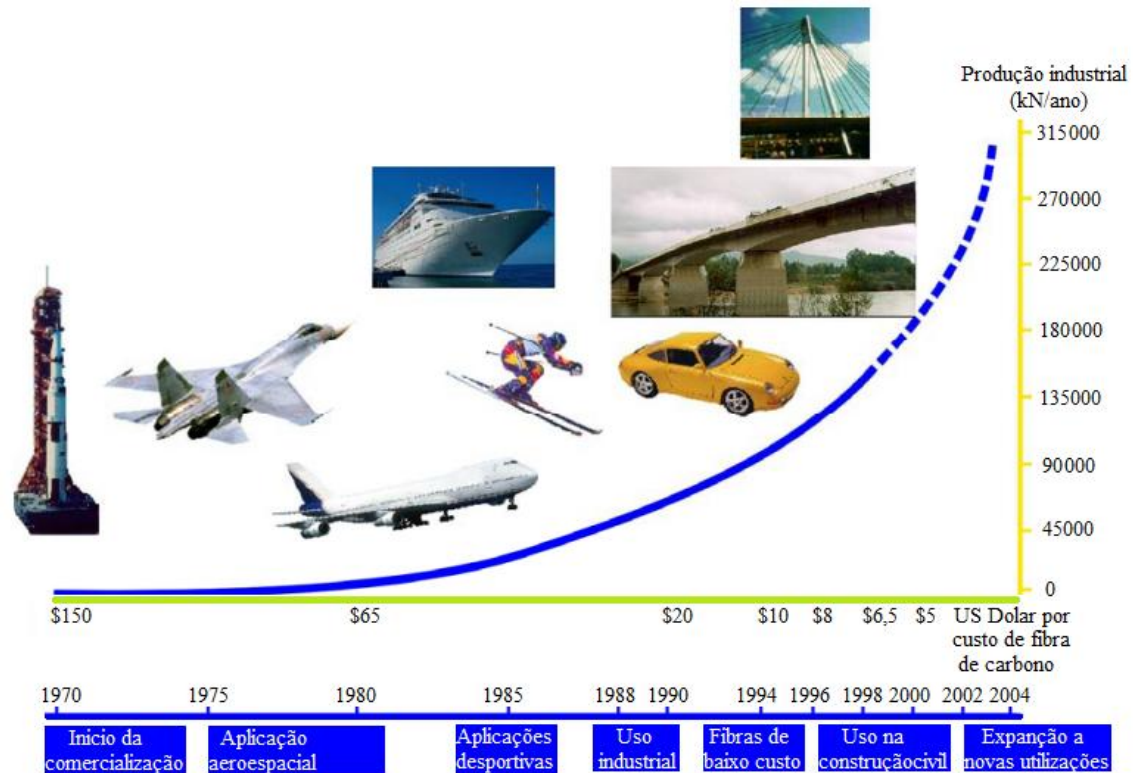
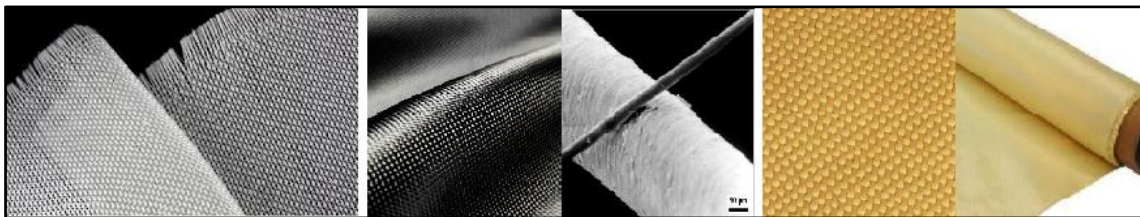


Figura 1.1. Evolução da utilização da fibra de carbono, em função do seu preço, da sua produção e campo de aplicação [44].

Estes materiais, designados por compósitos, resultam da “união” entre as fibras de reforço, orgânicas ou inorgânicas, a resina termo endurecível e as cargas de enchimento designadas por *fillers*. Os principais tipos de compósitos de fibra comercializados são os de vidro, GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), carbono, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), e aramidica, AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer), Figura 1.2.



Fibra de vidro (à esquerda), de carbono (ao centro) e aramidica (à direita) [42]

Figura 1.2- Diferentes tipos de fibra

Ao contrário das chapas metálicas, estes materiais apresentam um peso próprio muito baixo, mas apresentam ainda outras propriedades interessantes e importantes no âmbito do reforço de estruturas, como por exemplo elevada resistência à tração, resistência à corrosão, elevada

resistência à fadiga, o facto de serem moldáveis, bom amortecimento ao choque e bom isolamento eletromagnético [44]. Mas não só do comportamento isolado dos materiais de reforço e da estrutura já existente vai depender o bom funcionamento dos elementos. É fundamental também que a ligação entre estrutura e reforço seja garantida adequadamente. Posto isto, torna-se importantíssimo garantir a aderência betão/FRP; logo, a superfície do betão deve ser tratada e analisada adequadamente para se garantir esta ligação, sendo que neste trabalho se dá atenção a este aspeto.

Apesar de se tratar de uma técnica relativamente recente, o desenvolvimento tem sido tal que aplicam-se já materiais compósitos para diversos fins, satisfazendo, um leque grande de formas de reforço. Como exemplo, refiram-se o reforço à flexão em lajes e vigas, o reforço ao esforço transversal, o encamisamento em pilares e ainda a aplicação de pré-esforço exterior, Figura 1.3.



Reforço de um pilar (à esquerda) [54], e de uma viga (à direita) [38]

Figura 1.3- Reforço de elementos estruturais com materiais compósitos

## **1.2 - Objetivo do trabalho de investigação**

O presente trabalho tem como base os ensaios de arrancamento de laminados compósitos aderentes a superfícies de betão realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e pretende analisar com pormenor a aderência entre os materiais compósitos e o betão, pois tal como visto na secção 1.1 a ligação entre estes materiais é fundamental para o funcionamento deste tipo de reforço. Foram realizados ensaios de arrancamento direto em lajes com compósitos



de GRFP, e com o intuito de aprofundar esta investigação fez-se ainda um envelhecimento acelerado com ciclo de marés, em que a água continha 5% de cloreto de sódio e estava a cerca de 30 graus Celsius e verificou-se a degradação causada por esse tipo de envelhecimento.

Os principais objetivos desta dissertação são os seguintes:

1. Realização de uma pesquisa sobre a literatura técnica existente em torno da temática;
2. Descrição de alguns dos principais métodos de arrancamento de laminados compósitos;
3. Apresentação, análise e crítica de alguns resultados obtidos por outros autores;
4. Análise das condições existentes a nível laboratorial, para que se possa definir um programa de ensaios exequível, de forma a avaliar que tipo de tratamento de superfície e ligação será mais adequado para utilizar no reforço com compósitos;
5. Realização de um conjunto de ensaios de arrancamento direto e análise dos resultados obtidos com vários tipos de betão, vários tratamentos de superfície e envelhecimentos por ciclos de marés;
6. Comparação dos resultados obtidos com e sem envelhecimento. Análise e comparação com os valores encontrados na literatura analisada;
7. Propor ensaios a realizar para que melhor se perceba a ligação betão-FRP, e a importância do tratamento de superfície.

### **1.3 - Organização da dissertação**

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos segundo os objetivos descritos anteriormente.

No 1º capítulo são apresentadas as ideias gerais sobre os objetivos do trabalho e é feita uma pequena introdução teórica ao tema estudado.

No 2º capítulo são apresentados os materiais em estudo, a forma como devem ser aplicados e como retirar o máximo proveito da ligação destes ao betão. Referem-se alguns dos campos de aplicação desta técnica e algumas das suas vantagens relativamente ao reforço com aço. São apresentadas ainda algumas condições ambientais desfavoráveis ao comportamento destes materiais.

No 3º capítulo descrevem-se alguns dos ensaios existentes para a avaliação da ligação betão-FRP e analisam-se estudos de outros autores que tiveram por base a utilização destes métodos.

No 4º Capítulo é apresentado o trabalho experimental realizado. Faz-se a análise da importância de vários fatores associados à superfície do betão e é ainda apresentado um programa de envelhecimentos por ciclos de marés. Por fim apresentam-se os resultados obtidos, antes e após os envelhecimentos, para ensaios de Arrancamento direto realizados.

No 5º capítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos no trabalho experimental.

No 6º capítulo faz-se a análise e comparação dos resultados obtidos no trabalho experimental. São ainda tiradas conclusões em relação aos resultados experimentais obtidos pelos autores referidos no capítulo 3. Por fim são apresentadas algumas recomendações sobre o tipo de ensaio utilizado, sobre os envelhecimentos e sobre a importância do tratamento da superfície do betão.

## **Capítulo 2 - Estado da arte**

### **2.1 - Aspetos gerais**

Existe uma crescente necessidade de reforçar os edifícios, pois tal como referido anteriormente muitos começam a apresentar anomalias que os podem tornar inutilizáveis.

Face à simplicidade de execução, ao aumento significativo da rigidez e da capacidade resistente dos elementos, o reforço com armaduras exteriores, nomeadamente chapas metálicas, na região mais tracionada dos elementos, foi ganhando grande importância. No entanto, este tipo de reforço apresenta alguns problemas: a relação resistência/peso é má e apresenta grande vulnerabilidade à corrosão, devido à exposição a que está sujeito, uma vez que as armaduras são exteriores ao betão. Logo, a solução para combater o problema da durabilidade do reforço passaria pela aplicação de um reforço não metálico, à base de fibras que não fossem suscetíveis a essa corrosão.

Começou então, no final da década de 80, a adotar-se mais frequentemente o uso de compósitos reforçados com fibras, FRP [48]. Com este material ficava garantida, não só, a resistência à corrosão, mas também um menor peso próprio do reforço, a elevada resistência mecânica e também a maior facilidade de adaptação aos elementos a reforçar. A Figura 2.1 mostra a fácil

adaptação do GFRP aos membros inferiores de duas estátuas a reforçar, no edifício Palladium no Porto [43].



Figura 2.1- Reforço dos elementos escultóricos decorativos (edifício Palladium, Porto) com GFRP [43].

Desde aí, este tipo de materiais e a sua aplicação na construção tem sido alvo de uma intensa investigação, pois existem muitos aspetos por conhecer, relacionados com a durabilidade destes materiais quando sujeitos a ambientes adversos e principalmente com a ligação destes materiais ao betão, uma vez que o bom funcionamento do reforço vai estar dependente desta ligação. Se este aspeto era já importante quando se colavam chapas metálicas aos elementos estruturais, no caso dos materiais compósitos ganha uma relevância ainda maior, uma vez que a utilização de buchas de ligação é desapropriada, ficando o sistema a depender exclusivamente do bom funcionamento fibra-resina-betão.

No presente capítulo será feita uma breve apresentação dos materiais em estudo, nomeadamente, o betão e os polímeros reforçados com fibras; abordar-se-á também os vários métodos para tratar uma superfície de betão e ainda a questão dos envelhecimentos e da degradação dos materiais quando expostos a ambientes adversos. Será ainda feito um resumo dos estudos experimentais levados a cabo por diversos investigadores.

## 2.2 - Materiais

### 2.2.1 - Fibras

As fibras são o componente responsável pelo bom comportamento mecânico dos compósitos, nomeadamente pela sua elevada resistência. Estas são definidas, segundo o American Society for Testing Materials (ASTM) – Committee D30, como materiais alongados com dimensão na razão de 10/1, no mínimo, com uma secção transversal de  $5 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$  e uma espessura máxima de 0,25mm. No entanto, para a formulação de um compósito, e mediante as propriedades que se lhe pretende conferir, existem ainda algumas considerações a ter em conta, como a composição química das fibras, o seu grau de concentração, o comprimento que podem ter, definindo-se neste campo como curtas ou longas (contínuas), e ainda a disposição que apresentam na matriz.

A possibilidade de, tal como referido, poder dispor as fibras na matriz, segundo várias direções, permite a distinção de vários tipos de sistemas, podendo esses ser: unidirecionais, bidirecionais e ainda multidirecionais.

Nos casos em que se pretende obter resistência à tração e módulo de elasticidade máximos numa direção, orientam-se todas as fibras precisamente nessa direção; no entanto, segundo outras direções estas mesmas propriedades serão nulas sendo este caso um sistema unidirecional. Os casos bidirecionais caracterizam-se pela distribuição das fibras em duas direções, geralmente compostos pelo entrelaçar perpendicular de sistemas unidirecionais. Estes sistemas têm especial interesse quando se pretende reforçar um elemento estrutural segundo duas direções principais (ortogonais entre si ou não), como por exemplo as lajes. Por fim, os sistemas multidirecionais são compostos pela aglutinação de fibras dispostas de forma aleatória, fibras estas que geralmente são consideradas como curtas, ao contrário dos dois sistemas referidos anteriormente, em que se utilizam fibras contínuas.

Os principais tipos de fibras contínuas existentes e também as que mais se utilizam em engenharia civil, são as de vidro (G), carbono (C), e as de poliamida aromática (Aramídicas (A)).

Estes tipos de fibra, tal como se pode ver na Figura 2.2, não apresentam, ao contrário do aço, patamar de cedência nem deformação plástica e são assim caracterizados pelo seu comportamento perfeitamente elástico.

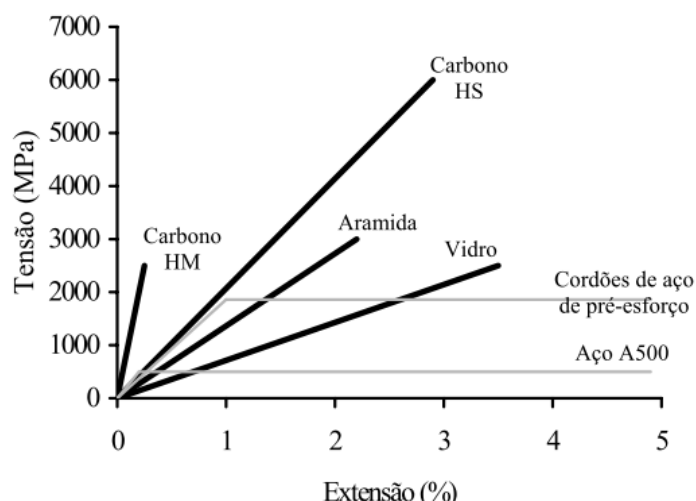


Figura 2.2. Diagrama tensão - extensão de diferentes tipos de fibras, do aço A500 e de cordões de pré-esforço [10].

### ***Fibras de vidro***

O vidro é um material produzido a partir de um dos mais abundantes recursos naturais, a areia, sendo o dióxido de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) o principal componente, cerca de 50 a 70 % do peso do vidro [9].

De entre os vários tipos de vidro distinguem-se os tipos “E”, “S” e “C”. O tipo C, também conhecido por AR é aquele que apresenta um melhor comportamento em meios alcalinos, já o S apresenta a mais elevada tensão de rotura, existindo apenas um diâmetro disponível para as fibras produzidas a partir deste vidro [55]. Por fim o vidro do tipo E, composto essencialmente por borosilicato, é utilizado para a produção da grande maioria das fibras de vidro utilizadas na construção, sendo ainda o que apresenta um melhor isolamento elétrico. As fibras obtidas a partir deste tipo de vidro, E-Glass, são produzidas segundo oito diâmetros padronizados, compreendidos entre 3,5 micrómetros e 13 micrómetros, permitindo assim a produção de produtos extremamente finos.

As propriedades mais relevantes no âmbito da engenharia civil, nomeadamente no reforço das estruturas, dos diferentes tipos de fibra de vidro, podem ser vistos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Propriedades aproximadas dos diferentes tipos de fibra de vidro [9].

Tipo de fibra de vidro	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de rotura [MPa]	Extensão máxima (%)
E	2,57	72,5	3400	2,5
S	2,47	88	4600	3,0
C	2,46	74	2350	2,5

Tal como já foi referido anteriormente os materiais compósitos de FRP são também produzidos, e comercializados em várias formas, desde mantas, perfis, folhas, fios ou ainda fibras picadas, (geralmente utilizadas no ramo militar e aeronáutico, na produção de barcos e aviões, sendo que geralmente são compostas por vidro do tipo S [9]). As fibras de vidro apresentam, além da referida elevada tensão de rotura, um bom comportamento como isolante elétrico e térmico, e são ainda as fibras mais baratas do mercado.

### 2.2.2 - Resina

A resina num sistema compósito é a componente que tem como objetivo unir as fibras, (garantindo assim a transmissão das cargas entre elas), manter a correta posição das fibras quando solicitadas, e ainda protege-las da agressividade do meio envolvente. Esta parte do material compósito é também conhecida como matriz, ligante ou ainda resina polimérica, devido à sua constituição química [9].

Hoje em dia existem dois grandes grupos de resinas, as termoplásticas e as termoendurecíveis. A grande diferença entre as duas está no comportamento quando expostas a temperaturas elevadas, as *termoplásticas* possuem uma capacidade múltipla de moldagem por intermedio de sucessivos aquecimentos e arrefecimentos enquanto as *termoendurecíveis* apenas podem ser moldadas uma vez. Este comportamento deve-se à composição química das resinas, no caso da *termoendurecível* as cadeias ligam-se de forma muito mais organizada que na *termoplástica*, formando uma rede tridimensional, e garantindo assim uma maior resistência química e mecânica da resina, bem como um melhor comportamento mediante altas temperaturas. As resinas *termoendurecíveis* são por estes motivos as mais utilizadas no ramo da engenharia civil.

Dentro das resinas termoendurecíveis existem as poliésteres, as vinilésteres e ainda as epoxídicas.

As resinas poliésteres são as mais versáteis, podendo ser produzidas de várias formas e com várias características diferentes; podem ser encontradas no mercado de forma a serem adaptadas a diferentes finalidades. São resinas que têm um baixo custo de produção e um baixo tempo de cura, relativamente às outras resinas [55]; no entanto apresentam uma menor durabilidade que as epoxídicas quando submetidas a ataques químicos e a aumentos de temperatura [12].

As vinilésteres são resinas com algumas propriedades interessantes no campo do reforço de estruturas, como a elevada resistência à corrosão e a facilidade de processo. Este tipo de resina é um híbrido entre as resinas epoxídicas vinílicas e as epoxídicas modificadas, chamando-se por vezes de resinas epóxi-viniléster.

As resinas epoxídicas são as preferidas para aplicação em reforço de estruturas devido às suas excelentes propriedades adesivas, elevada resistência e módulo de elasticidade, baixa retração e elevada durabilidade [9 e 55]. Os problemas da resina epoxídica são a sua elevada fragilidade e a redução de algumas das suas propriedades na presença de humidade. O custo desta resina é superior ao dos poliésteres. As propriedades da resina epoxídica são apresentadas Tabela 2.2 onde se pode também comparar as suas características com as do aço e do betão. Note-se que o intervalo de alguns valores apresentados não abrange todo o leque de soluções encontradas no mercado.

As resinas epoxídicas utilizadas são, em regra, compostas por dois elementos, a resina de epóxido e o endurecedor. Para se obter um bom produto epóxido a mistura destas duas componentes deve ser feita nas quantidades exatas, geralmente fornecidas pelo fornecedor, e de forma cuidada para que qualquer molécula do endurecedor estabeleça ligação com as moléculas da resina. O endurecimento do adesivo vai ser função da densidade destas ligações químicas, mas também da estrutura química da resina ainda líquida, do agente de endurecimento e das condições em que se dá a reação, tais como a temperatura, tempo e humidade [44].



Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas do adesivo tipo epoxídico, do aço e do betão [58].

Propriedades	Adesivo epoxídico	Betão	Aço
Resistência à compressão (MPa)	55-110	25-150	200-2000
Resistência à tração (MPa)	9-20	1-4	200-2000
Módulo de elasticidade (GPa)	0,5-20	20-50	200
Coef. dilatação térmica ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	25-30	8-16	10-15
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1450-1550	2300	7800
Coefficiente de Poisson	0,3	0,2	0,3

Como já referido anteriormente as resinas são materiais muito complexos quimicamente. O seu comportamento está diretamente relacionado com temperaturas, quantidades de material a fazer, humidade, e ainda a forma de aplicação e o tempo que se demora na operação. Este último aspeto faz com que, para se obter o melhor comportamento possível das resinas, se tenha de ter atenção a alguns parâmetros, aquando da sua aplicação, como por exemplo:

- *Tempo de utilização da resina, (Pot life)*, é o período contado a partir da mistura da base, do endurecedor e aditivos, e em que é possível a sua aplicação sem qualquer dificuldade. Os valores do *pot life* podem variar desde apenas uns minutos e algumas horas, e dependem de vários fatores, entre os quais, a temperatura ambiente; a quantidade de mistura feita, uma vez que na cura existe a libertação de calor e esta acelerará o processo; e ainda a presença, ou não, de inertes, uma vez que estes podem absorver a temperatura criada pela cura [44]. A utilização da mistura “fora” do *Pot life* vai introduzir grandes problemas no comportamento do material compósito, uma vez que esta não fará com perfeição a união entre as fibras e o betão dos elementos a reforçar.
- *Tempo de contacto, (open time)*, é o tempo em que é possível fazer a aplicação do reforço, ou seja, é o período desde a aplicação da resina à superfície e a altura em que deixa de ser possível fazer a colagem.

- *Temperatura de transição vítrea* [ $T_g$ ], é a temperatura para a qual ocorre uma transição de relevo nas propriedades físicas e mecânicas da resina. No caso em que esta temperatura é atingida e a resina estava com uma temperatura inferior, ocorre a transição de um estado sólido, também conhecido como vítreo, para um estado viscoso, e vice-versa para o caso em que inicialmente a temperatura da resina era superior a  $T_g$ .

### 2.2.3 - Materiais compósitos de FRP

Material compósito é aquele que possui no mínimo dois componentes diferentes identificáveis macroscopicamente na sua constituição, sendo que geralmente esses componentes são dotados de propriedades físicas e mecânicas completamente distintas. A união desses materiais tenta aproveitar sempre as características mais positivas de cada um, dando assim ao material compósito propriedades que seriam impossíveis de alcançar com o funcionamento de cada um dos materiais em separado.

Existem inúmeros exemplos de materiais compósitos, nos mais diversos ramos da indústria, como por exemplo na aeronáutica e na construção de barcos. Neste caso interessa debruçar o estudo sobre os compósitos utilizados na construção civil, nomeadamente na reparação e no reforço das estruturas.

As resinas e as fibras são os principais componentes dos materiais compósitos de FRP, sendo por vezes adicionados alguns aditivos para melhorar o seu comportamento. Estes materiais apresentam características únicas, comparativamente com os restantes materiais utilizados na conceção de estruturas, tal como se pode ver na Figura 2.3.

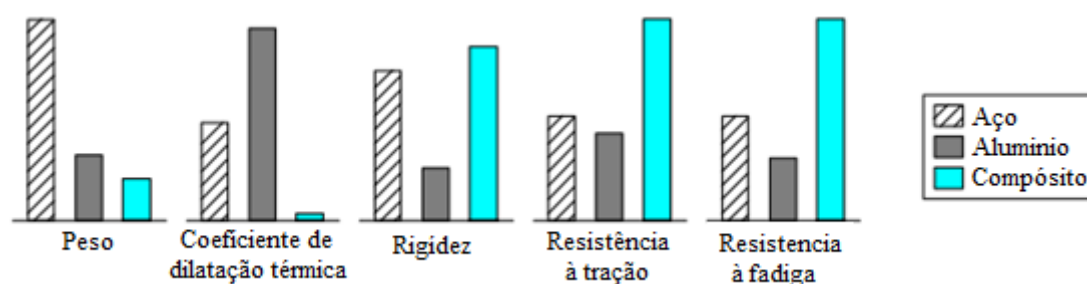


Figura 2.3. Propriedades do aço, do alumínio e dos materiais compósitos [44].

Dentro dos materiais compósitos definem-se dois grandes grupos, os pré-fabricados, também designados como laminados, e os curados *in situ*.

No caso dos compósitos pré-fabricados, produzem-se os laminados de FRP que ficam preparados a ser colados em obra no elemento a reforçar. As fibras são dispostas e impregnadas na resina termoendurecível que servirá de matriz, e consolidadas por um processo de pultrusão com controlo de espessura e largura do compósito, ou seja, a resina manterá o alinhamento das fibras segundo a direção pretendida e ainda protegerá contra os agentes agressivos como por exemplo as águas da chuva e o gelo. Segundo Juvandes [44], pultrusão é o método mais utilizado no fabrico destes produtos. É um processo contínuo que combina as ações de tração e extrusão para a produção de um compósito, com final constante. Os fios são embebidos em resina, e para processar a cura e forma do FRP são esticados e passados por uma fiação aquecida. Na Figura 2.4 pode-se ver um esquema representativo do processo de pultrusão.

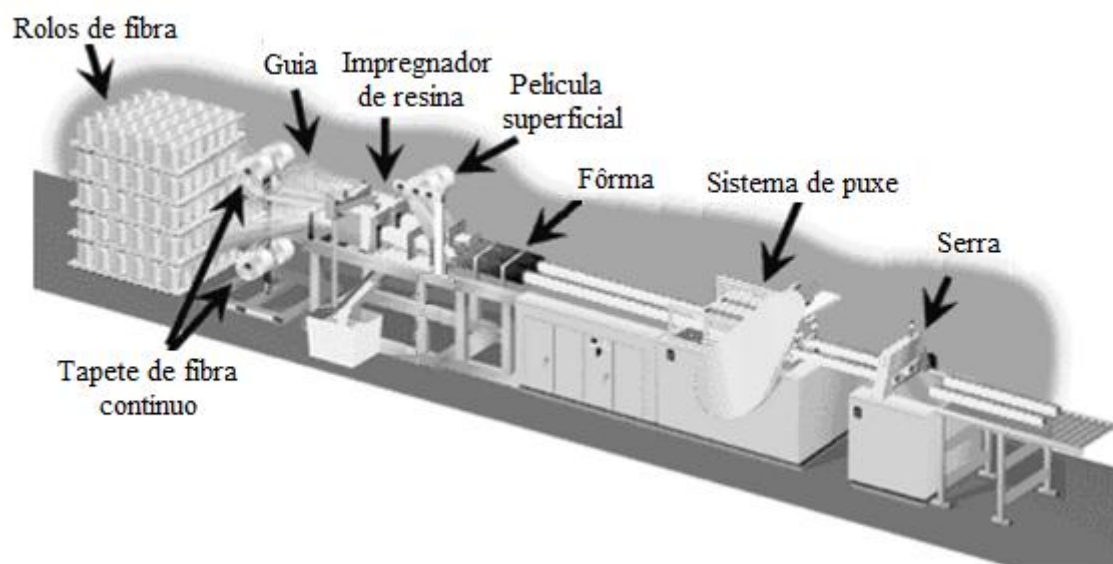


Figura 2.4 – Processo de pultrusão [9].

A grande vantagem deste processo é a garantia de que em fábrica se conseguem produzir com precisão os laminados com as espessuras, larguras e formas pretendidas, garantindo assim que em obra os elementos são reforçados sempre com a quantidade necessária e disposição mais correta de fibra.

No caso dos compósitos curados *in situ*, as fibras e as resinas são misturadas no local da obra. As fibras são contínuas e geralmente em forma de fios, mantas ou tecidos, consoante o tipo de reforço que se quer executar, e apresentam-se em estado seco ou pré impregnado. As fibras são

impregnadas nas resinas e dispostas sobre a superfície a reforçar, sempre com o cuidado de conferir a orientação pretendida; estas vão polimerizar e garantir a aderência à superfície existente, formando assim o conjunto FRP. Dependendo do nível de reforço a executar podem-se colocar varias camadas de fibras, dispostas ou não segundo a mesma direção.

Na Figura 2.5 pode-se ver a diferença entre um laminado de fibra de vidro e um tecido antes de ser impregnado.



Figura 2.5- Tecido de fibra de vidro (à esquerda) [37] e laminado de fibra de vidro (à direita) [36].

#### **2.2.4 - Betão**

O betão tem sido, principalmente desde a segunda guerra mundial, o material mais utilizado na construção de estruturas nos últimos anos, e apesar do crescimento na realização de estruturas de outros materiais, nomeadamente as metálicas, espera-se que o betão continue com grande utilização durante as próximas décadas [16].

Este é também um material compósito, constituído pelos agregados, (que podem possuir vários tamanhos, desde agregados com alguns centímetros às partículas mais finas de areia), envolvidos numa matriz, que neste caso é a pasta formada pela mistura entre o cimento Portland e água. Tradicionalmente o betão é constituído por 4 fases distintas, a água, o agregado grosso, o agregado fino, e o cimento Portland e a quantidade de cada um destes elementos vai definir as suas características, tanto em fresco como após a cura. Mas atualmente existem vários adjuvantes que se podem adicionar com a intenção de alterar as suas propriedades. Melhorar a

trabalhabilidade, alteração do tempo de cura, impermeabilização o betão são algumas das características que se podem alterar com a ajuda dos adjuvantes existentes.

A qualidade e consequente comportamento de um betão numa estrutura vai depender não só das quantidades de cada um dos constituintes, como referido anteriormente, mas também das técnicas que se usam na sua produção, transporte, colocação em obra, compactação e vibração, e ainda o acompanhamento que se dá ao betão enquanto este cura. A “rega” do betão durante a cura serve para que este não perca a água rapidamente e vai impedir que surjam fissuras, estas serão não só prejudiciais ao betão, mas também às armaduras, pois irão permitir que estas fiquem expostas e oxidem rapidamente.

A durabilidade de um betão vai depender, como referido no parágrafo anterior, da sua qualidade inicial. No entanto mediante a exposição ambiental e as condições de serviço das estruturas (ou seja, devido a ataques químicos e/ou físicos) a deterioração pode ocorrer com maior ou menor rapidez tornando-se por isso necessária a reparação ou substituição do mesmo.

## **2.3 - Importância do Tratamento de Superfície**

O tratamento da superfície onde se vai aplicar o reforço com compósitos é fundamental. Segundo vários autores, [1, 2, 16], a eliminação de qualquer fator na superfície do betão que possa constituir um ponto/zona de maior fragilidade, como por exemplo, sujidade (pó ou óleos), pasta de cimento, corrosão das armaduras existentes, betão degradado ou menos resistente, é fundamental para o bom desempenho do reforço.

Segundo o ACI 440 [2], existem duas categorias diferentes no tipo de reforço por FRP. A primeira é aquela em que não é necessário existir um adesivo entre o FRP e a superfície de betão, bastando existir um contacto permanente entre os dois e o FRP confinar completamente o elemento estrutural, de forma a ser unido entre si nas extremidades. No entanto o adesivo é geralmente utilizado pois facilita a instalação do compósito. Um exemplo deste caso são os confinamentos realizados em colunas e pilares. A segunda categoria é aquela em que a superfície de betão ganha especial importância, uma vez que, é necessário o adesivo de ligação entre o elemento estrutural e o FRP para que as cargas sejam transmitidas. Este é o caso em que se fazem reforços em lajes e vigas, à flexão e ao esforço transversal.

Irregularidades a nível da planimetria da superfície podem também ser prejudiciais ao comportamento dos reforços com fibras, principalmente porque surgem forças de desvio que podem fazer as fibras “descolar” nessas zonas, Figura 2.6. Nestes casos é necessário fazer um nivelamento, retirando o betão em excesso, ou então preenchendo as cavidades com uma argamassa epoxídica, o “putty” [54].

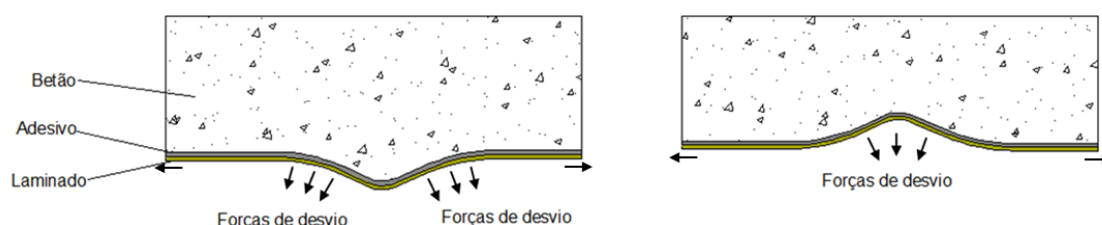
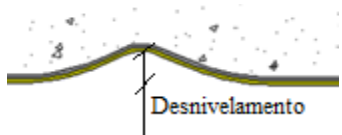


Figura 2.6- Irregularidades que provocam forças de desvio nos laminados de FRP.

Na Tabela 2.3 são apresentados, segundo Dimande [23], os valores limite admitidos para os desnivelamentos na superfície do betão.

Tabela 2.3 – Valores permitidos para o desnivelamento da superfície do betão [23].

Tipo de sistema FRP		
	Desnivelamento permitido numa base de 2,0 m [mm]	Desnivelamento permitido numa base de 0,3m [mm]
Pré-fabricado, espessura > 1 mm	10	4
Pré-fabricado, espessura < 1 mm	6	2
Curado “in situ”	4	2

Nos casos em que as fibras são colocadas de forma a envolver uma secção retangular, as arestas devem ser arredondadas, (por exemplo com uma rebarbadora, Figura 2.7) até formarem um raio de, no mínimo, 13 milímetros [2]. Note-se que este não é um problema de aderência betão-FRP mas sim uma questão de confinamento, pois este processo reduzirá as concentrações de tensões nessa zona do FRP.

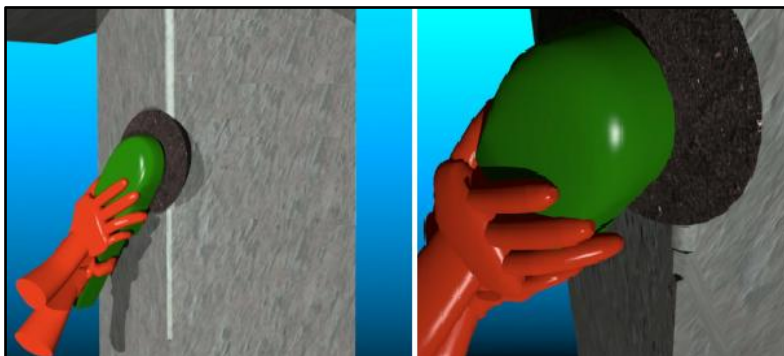


Figura 2.7 – Arredondamento de arestas de betão com uma rebarbadora [54].

Logo, para se obter o máximo proveito do reforço com compósitos colados ao betão, é necessário garantir as condições anteriormente referidas, mas não só, pois a aderência do reforço ao elemento estrutural é um fenómeno complexo, que depende de mais fatores, e de vários tipos de ligação: ligação química, dependente da reação entre o betão e o material de reforço, da penetração da resina na rugosidade e porosidade do betão; ligação física, devida essencialmente às tensões de van der Waals [13]. Logo, a preparação das superfícies não deve ser feita apenas quando existem problemas no betão, o aumento da rugosidade e a exposição de algum agregado fará com que a ligação do FRP ao elemento estrutural seja melhorada, mesmo quando o betão se encontra em boas condições.

Segundo o ACI Committee 440 [2] e Committee 546 [1], um dos passos mais importantes no reforço e reparação de estruturas é a preparação da superfície. O resultado final deste processo vai depender em muito dos procedimentos e métodos adotados para a sua execução.

Segundo estes comités os métodos para preparação da superfície consistem no seguinte:

- Limpeza química: em muitos casos os métodos de limpeza química não são apropriados para utilizar com os materiais de reforço em FRP; no entanto, a sua utilização pode ser tida em conta, desde que feita com cuidado para não contaminar o betão e desde que os vestígios dos químicos sejam totalmente removidos antes da aplicação dos reforços;
- Ataque ácido ao betão: a preparação de superfícies com ácidos tem sido feita com alguma regularidade pois é um método eficaz na remoção da pasta de cimento e de muitas impurezas que possam existir no betão, no entanto, o ACI 515.1R diz que a preparação com ácidos apenas deve ser considerada quando não existe a possibilidade de utilizar outros métodos.
- Preparação mecânica: esta técnica consiste na remoção de finas camadas de betão utilizando alguns equipamentos mecânicos como por exemplo martelos pneumáticos e martelos de agulhas, moedores e escarificadores. Devido à grande diversidade de meios para remover o betão existirá também uma grande diversidade de resultados finais a nível da rugosidade e exposição de agregados na superfície.
- Preparação abrasiva: esta técnica distingue-se da anterior pelo tipo de equipamento utilizado, que obviamente oferece superfícies diferentes dos equipamentos para preparação mecânica. Consiste também na remoção de camadas finas de betão, mas à base de equipamentos de abrasão, como por exemplo o jato de areia, jato de água e ainda o Shotblaster (método idêntico ao jato de areia mas que utiliza pequenas partículas metálicas em vez da areia).

Estes métodos têm sido investigados ao longo dos últimos anos, não existindo ainda consenso quando ao método ideal a ser utilizado.

Alguns autores [59], indicam que o aumento da rugosidade leva a um aumento da resistência na ligação betão-adesivo, logo, a um melhor comportamento do reforço. No entanto, existem autores [13], que defendem que os métodos muito agressivos podem provocar danos no betão, como por exemplo micro-fissurações, o que implicaria que o comportamento fosse pior do que o esperado.



## 2.4 - Métodos de tratamento de superfície

Neste subcapítulo será feita uma pequena descrição dos dois métodos de tratamento de superfície que serão utilizados na parte experimental do presente trabalho.

### 2.4.1 - Jacto de areia

O jacto de areia é, assim como o jacto de água e o shotblasting, um método abrasivo. Estes métodos são caracterizados pelas altas pressões a que expõem contra as superfícies a tratar os materiais abrasivos a altas velocidades, sempre com o intuito de remover finas camadas de betão e qualquer tipo de contaminantes existentes. Estes métodos podem ser também utilizados para corte, por exemplo de betão ou rocha, sendo que a pressão para estes casos terá de ser superior e a área a atingir com o jacto menor.



Figura 2.8 – Operário trata parede de betão com jacto de areia [40].

No ramo da construção civil, o jacto de areia é, dentro destes métodos, o mais utilizado para tratamento de superfícies.

As areias utilizadas podem ser de vários tipos, desde a areia comum, conhecidas por areia de sílica, até partículas metálicas. Estas partículas devem estar compreendidas entre os 212  $\mu\text{m}$  e os 4,75 mm, devem ter forma angular e não arredondada de maneira a que o seu impacto no betão seja mais significativo, e assim obter resultados mais rapidamente, a dimensão da areia deve ser

tanto maior quanto maior for a rugosidade pretendida (este parâmetro depende também da pressão do compressor e da distancia a que é utilizado o jacto).

Existem três formas distintas de aplicar o jacto de areia [1]:

1. As areias são projetadas, ao ar livre e sem qualquer impedimento, contra a superfície de betão, e a pressão utilizada deve ser no mínimo 860 kPa. Esta pressão deve aumentar conforme a rugosidade pretendida, bem como a dimensão do agregado, como referido anteriormente. Para pequenas remoções de betão, ou simplesmente para remover a pasta do cimento, pode ser utilizada areia mais fina; no caso em que se pretenda maior rugosidade ou executar corte com este método, utilizam-se areias mais grossas e uma pressão mais elevada. Apesar de este método poder ser utilizado para fazer cortes no betão não é economicamente viável.
2. As partículas de areia que são expelidas pelo compressor e perdidas no ar, são recuperadas por um ciclo de água. Este é um método apenas utilizado para limpeza da superfície de betão uma vez que o efeito de impacto da areia no betão é reduzido, pelo facto da água intercalar alguma areia.
3. Esta última opção fornece resultados muito idênticos ao processo referido anteriormente. A areia é expelida do compressor misturada com água a uma pressão entre 10,3 e 20,7 MPa. A água reduz substancialmente o efeito do jacto de areia e por isso recomenda-se apenas a sua utilização para remoção da pasta do cimento. A água resultante deste processo deve ser tratada antes da sua libertação nos sistemas de esgotos.

#### **2.4.2 - Rebarbadora com disco abrasivo**

Existem discos de corte para utilizar em metais ou em rochas, e existem discos abrasivos que servem para limpar, regularizar, eliminar pequenas camadas de contaminantes como por exemplo a oxidação de metais, e ainda eliminar pequenas camadas superficiais de betão.

O tratamento de superfície realizado com rebarbadora e disco abrasivo é, segundo o ACI 546 [1], um método de preparação mecânico e funciona basicamente pelo desgaste que os discos e as suas pequenas peças diamantadas, devido à rotação atingida, provocam no betão.

## 2.5 - Envelhecimento e Degradação Ambiental

Como referido anteriormente, as boas características dos materiais compósitos têm levado à sua utilização de forma crescente nas últimas décadas. No entanto, as suas características são bem conhecidas apenas a curto prazo, uma vez que a sua utilização ainda é relativamente recente e desconhece-se a maioria das propriedades destes materiais a longo prazo. A durabilidade, a história de carga e a hipótese do reforço ser submetido ao fogo, são situações críticas a que estes materiais poderão estar sujeitos [46]. Sendo esperados tempos de vida útil do betão reforçado com compósitos na ordem dos 50 a 100 anos, interessa então analisar, a longo prazo, o comportamento destes materiais e das suas propriedades a nível físico, químico e mecânico [21].

Os estudos feitos, sobre os ataques ambientais aos reforços com materiais compósitos são baseados, essencialmente, em ensaios experimentais de envelhecimentos acelerados, porque tal como se referiu no parágrafo anterior, o tempo de utilização destes materiais é relativamente curto, em comparação com o período de degradação que tende a ser muito extenso.

Analisando-se os constituintes de um reforço feito com compósitos de FRP verifica-se que todos os seus elementos, betão, fibras e resinas podem ser danificados por agentes de origem ambiental [48]. Juvandes e Figueiras [46] incluem nos fatores ambientais que prejudicam os reforços com FRP, a temperatura, a humidade, radiação ultravioleta (UV), agressões químicas de ambientes alcalinos e ácidos, as reações alcalis-sílica dos constituintes do betão, ciclos de gelo-degelo, influencia das águas salinas e potáveis, bem como a condutividade elétrica e as ações do vento e das poeiras ambientais.

Em Portugal é fundamental dar especial atenção a alguns efeitos ambientais. Após consultar o *site* do Instituto Português de Meteorologia [41] verifica-se que podem existir problemas com ciclos de gelo-degelo, por exemplo no Norte do País, onde as temperaturas podem variar entre negativas e positivas, muitas vezes em apenas 12 horas (Figura 2.9). As elevadas temperaturas, por vezes superiores a 40 graus Celsius são também um dos problemas que se pode encontrar em Portugal, isto porque a ação de temperaturas elevadas nas resinas e nos compósitos de FRP pode ser penalizadora. Outro dos principais agentes ambientais que se encontra em Portugal é a água do mar e os ciclos de marés em estruturas na costa, os quais podem atuar sobre elementos de estruturas marítimas.

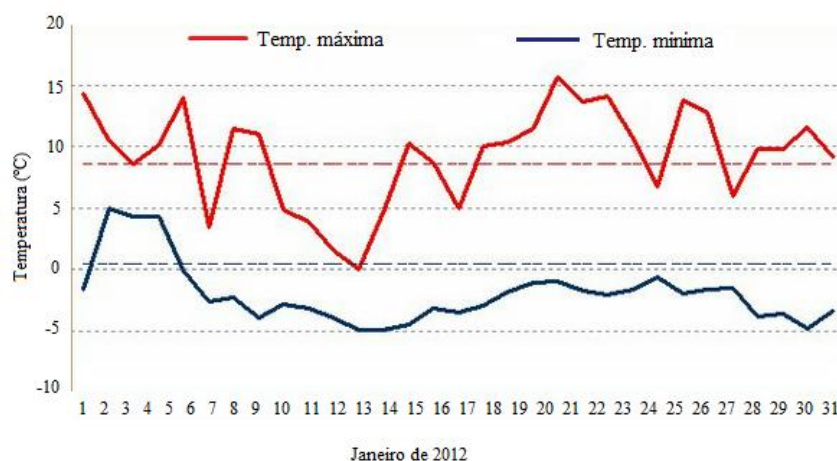


Figura 2.9 – Temperatura mínima e máxima ao longo do mês de Janeiro de 2012, Bragança [41].

Apesar das dificuldades em recriar os danos causados pelas exposições ambientais ao longo do tempo são já tomadas algumas considerações em projeto de forma a precaver a estrutura para a possível degradação que o material de reforço vai sofrer. As propriedades mecânicas, a ser utilizadas no dimensionamento de um reforço deste tipo, tendo em conta a degradação ambiental são então afetadas por fatores de redução.

O ACI 440 [2], recomenda a utilização de *fatores de redução ambiental* ( $C_E$ ) para minorar as propriedades do FRP. A expressão 2.1 deve ser utilizada para o cálculo da tensão última a adotar em projeto.

$$f_{fu} = C_E \times f_{fu}^* \quad 2.1$$

De forma homóloga, o valor da extensão última deverá ser reduzido conforme a exposição ambiental, aplicando a expressão 2.2.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \times \varepsilon_{fu}^* \quad 2.2$$

Uma vez que os materiais compósitos de FRP têm um comportamento elástico linear até à rotura, o módulo de elasticidade pode ser descrito pela lei de Hooke e, pelo que se pode observar na 2.3, este não será afetado pelas condições ambientais. O módulo de elasticidade a utilizar em projeto será então o fornecido pelo fabricante.

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\epsilon_{fu}} = \frac{C_E \times f_{fu}^*}{C_E \times \epsilon_{fu}^*} = \frac{f_{fu}^*}{\epsilon_{fu}^*} \quad 2.3$$

Na Tabela 2.4 são apresentados os fatores de redução ambiental ( $C_E$ ) a tomar para os diferentes tipos de ambiente e diferentes tipos de resina.

Tabela 2.4 – Fator de redução ambiental para diferentes sistemas e FRP e exposição ambiental [2].

Condições de exposição	Tipo de fibra e resina	Fator de redução (CE)
Exposição interior	Carbono - Epoxídica	0,95
	Vidro - Epoxídica	0,75
	Aramídica - Epoxídica	0,85
Exposição exterior	Carbono - Epoxídica	0,85
	Vidro - Epoxídica	0,65
	Aramídica - Epoxídica	0,75
Ambiente agressivo (estações de tratamentos, locais de uso de químicos)	Carbono - Epoxídica	0,85
	Vidro - Epoxídica	0,5
	Aramídica - Epoxídica	0,7

### 2.5.1 - Influência da temperatura

As temperaturas elevadas podem afetar os reforços com compósitos de FRP, em especial as resinas e os adesivos, uma vez que, tratando-se de polímeros, o aumento de temperatura fará com que ocorram transformações nas suas cadeias moleculares que originarão a perda das propriedades e capacidades estruturais. Sendo assim o reforço fica sem qualquer efeito uma vez que é afetada a resina e o compósito deixam de funcionar, já que é a resina a responsável pela ligação e transmissão das cargas entre o reforço e o elemento estrutural.

O problema neste tipo de materiais surge principalmente quando a temperatura ambiente se aproxima da temperatura de transição vítrea que se encontra entre os 60°C e os 82°C para os sistemas atualmente comercializados [2]. Este facto está representado na Figura 2.10 através das curvas da variação do módulo de elasticidade  $E'$  (módulo de ganho) e do desenvolvimento do coeficiente de perda ( $\tan \delta$ ).

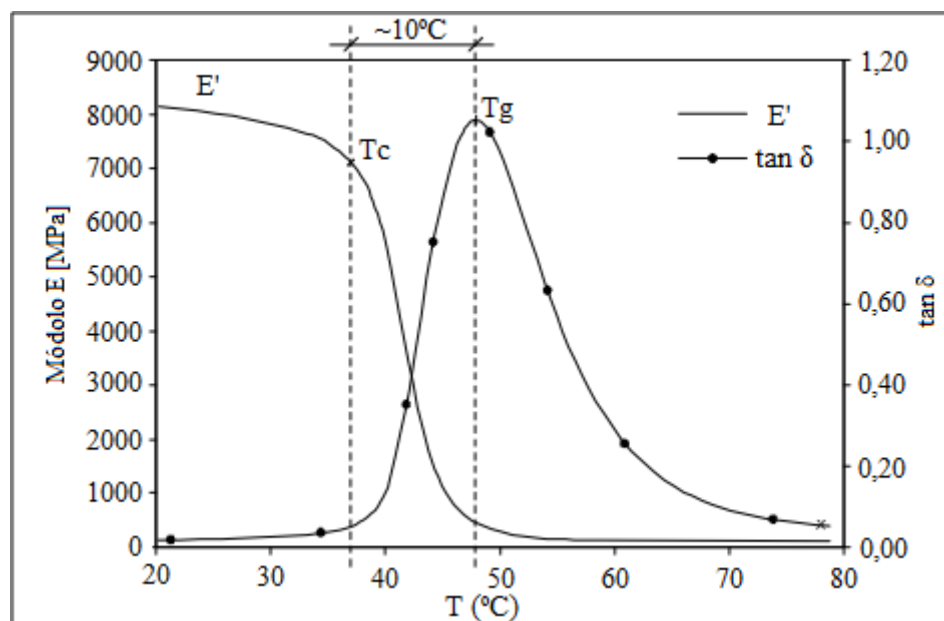


Figura 2.10 – Efeitos da temperatura no módulo de ganho ( $E'$ ) e no coeficiente de perda ( $\tan \delta$ )[46].

Uma vez que FRP e betão poderão ter coeficientes de dilatação térmica diferentes, serão introduzidas tensões entre estes materiais quando sujeitos a variações de temperatura. O próprio compósito de FRP, sendo constituído por materiais diferentes, terá também tensões internas porque os coeficientes de dilatação térmica da resina e das fibras são diferentes. As fibras de carbono têm um coeficiente próximo de zero, as de vidro próximo do betão, e os polímeros utilizados podem ter este parâmetro 5 vezes maiores que os do betão. Uma vez que a fibra pode ter diversas orientações e as camadas dos componentes são muito finas é complicado calcular com precisão as tensões internas criadas.

A temperatura é também um fator muito importante quando se trata do envelhecimento e degradação de um material, pois esta envolve diversas reações químicas. O GFRP e o betão não fogem à regra e portanto a temperatura pode levar a uma aceleração dessas reações químicas e por consequência um envelhecimento mais acelerado.

Um pequeno aumento da temperatura pode provocar uma maior abertura de poros e até pequenas micro-fissurações, locais onde possivelmente se poderá armazenar humidade.

### 2.5.2 - Influência da humidade

A humidade é um dos agentes ambientais que mais danos provoca nas obras de construção civil, e é um dos principais responsáveis na degradação de praticamente todos os materiais que se utilizam neste ramo. A oxidação do aço, a carbonatação do betão e o apodrecimento da madeira são alguns exemplos dos danos causados, ou acelerados, pela presença de humidade [31].

Os reforços com compósitos de FRP são também eles suscetíveis de absorver humidade, nomeadamente as resinas poliméricas. A humidade pode provocar uma diminuição de cerca de 10°C a 20°C na temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e consequente perda das propriedades mecânicas do compósito (Figura 2.11). Este efeito acontecerá quer no adesivo quer no FRP fazendo com que o reforço fique enfraquecido, pois esta diminuição fará a componente polimérica ficar mais macia, havendo também uma diminuição acentuada da resistência e rigidez [46]. Segundo o EUROCOMP [30] o valor de  $T_g$  pode ser reduzido a 75% do seu valor inicial ( $T_{go}$  - seco), devido a uma concentração de 4% de humidade ( $T_{gw}$  - húmido); já a resistência à flexão, devido a uma concentração de apenas 1,5% de humidade, pode ser reduzida a 50% da inicial. Este efeito pode ser revertido no caso de a resina ser epoxídica, desde que a água seja removida por secagem; já no caso das resinas poliésteres e vinilésteres as alterações podem ser reversíveis ou não, dependendo do tempo e da temperatura de exposição da resina; no entanto a dilatação provocada pela presença da água pode introduzir danos permanentes, como micro-fissurações, irreversíveis em qualquer tipo de resina [12].

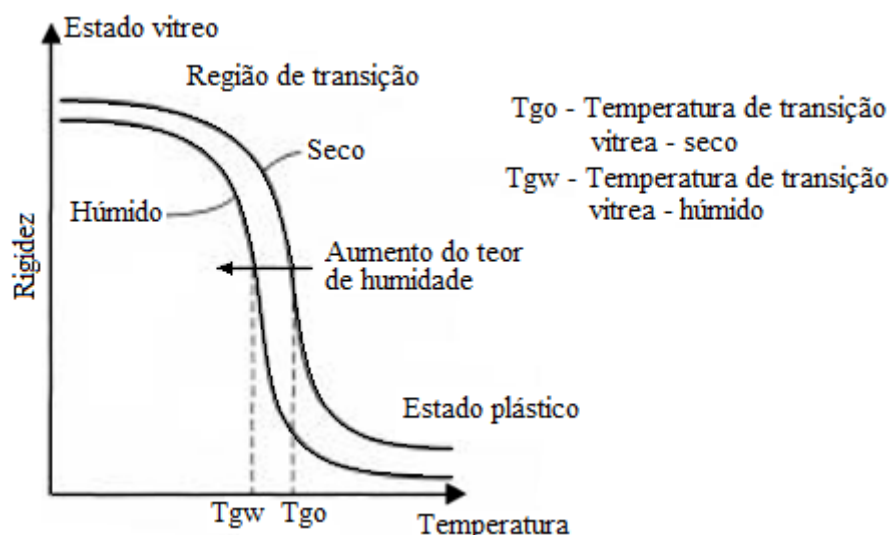


Figura 2.11 – Efeitos da humidade no comportamento de uma resina [46].

As fibras aramídicas podem absorver até 13% do seu peso em água. Este fenómeno provoca uma diminuição da capacidade resistente à tração da fibra e afeta também a interface fibra-resina. Já as fibras de carbono praticamente não sofrem alterações com a presença de água, logo pode-se considerar que o comportamento de um reforço com CFRP apenas é afetado pelos danos sofridos na matriz polimérica [31].

### 2.5.3 - Influência dos cloretos e do ciclo de marés

Os cloretos são um dos principais problemas para as estruturas, nomeadamente para as armaduras. O reforço com chapas metálicas torna-se então desapropriado para estes ambientes o que toma ainda mais importância o reforço com materiais de FRP, e o comportamento destes perante o sal. É misturado com água que os cloretos mais frequentemente são encontrados na natureza e portanto é desta mesma forma que com mais frequência atingem as estruturas, por exemplo as que se encontram ao longo da costa. Note-se que Portugal tem uma grande costa logo este facto toma especial relevância.

A água do mar pode ainda submeter as estruturas a duas situações distintas: a imersão total ou ciclos de imersão-emersão (as marés). De acordo com Gomes et al.[34] a água do mar de todo o globo terrestre possui uma salinidade média de 3,5% ou seja, 35 gramas de cloretos por cada litro de água. A salinidade varia entre 3% e 3,7%; no entanto existem locais no planeta onde este valor pode ser bem maior, como é o caso do Mar Morto no Médio Oriente. Em Portugal a salinidade média da água do mar é de 3,5%.



Segundo a pesquisa elaborada por Etten [28], a imersão em água salgada resulta na plastificação da resina epoxídica e consequente redução das suas propriedades mecânicas. Tal degradação leva a que a ligação betão-resina fique fragilizada.

## **2.6 - Ensaios de Arrancamento de Compósitos de FRP**

Depois de normalizada a superfície do betão e aplicados os compósitos de FRP, devem ser realizados ensaios para caracterizar a tensão de aderência da ligação entre os materiais, (ligação betão-adesivo e ligação adesivo-compósito). De modo a permitir a máxima transferência de forças entre o betão e o compósito, a superfície deve apresentar boas condições de aderência.

Existem vários tipos de ensaios de aderência: o ensaio de torsão, o ensaio de corte direto, o Peel test e ainda o ensaio de arrancamento direto são alguns dos ensaios realizados atualmente para avaliar a ligação FRP-betão.

Estes ensaios permitem a obtenção de parâmetros necessários para definir um bom comportamento do reforço e ainda analisar este comportamento perante varias situações. Apesar de serem ensaios destrutivos, os danos provocados não são significativos no comportamento da estrutura. São ensaios de fácil execução, alguns que são frequentemente utilizados em obra e outros mais em laboratório, mas todos ensaios muito utilizados para analisar a problemática relacionada com o tema em causa. Por estes motivos, os ensaios acima indicados foram alvos de estudo neste trabalho.

No presente capítulo far-se-á uma pequena descrição destes ensaios. Serão ainda apresentados e criticados trabalhos realizados por outros autores em que se utilizem os métodos de ensaio apresentados.

### 2.6.1 - Ensaio de torção

O ensaio de torção consiste na aplicação de uma força com o apoio de um aparelho mecânico denominado por chave de torção (Figura 2.12). Esta chave tem como objetivo aplicar um momento com o apoio manual do operador e registar o seu valor no momento da rotura [25]. Para a realização deste ensaio é necessário realizar carotes no FRP com a dimensão das pastilhas metálicas que serão coladas no mesmo, procedimento idêntico ao ensaio de arrancamento direto.



Figura 2.12. Aplicação de momento utilizando a chave de torção [25].

Após a colagem das pastilhas metálicas de arrancamento dos carotes e a cura da resina utilizada para essa colagem, é realizado o ensaio. O valor da tensão de aderência é obtido a partir da expressão 2.4.

$$\tau = \frac{T_R}{\pi \times R^3} \quad 2.4$$

Em que:

- $T_R$  – Momento registada pela chave de torção no momento da rotura
- $R$  – Raio da *pastilha*

### 2.6.2 - Ensaio de Corte Direto

O ensaio de corte direto consiste na imposição de uma força de tração aos compósitos de FRP, aplicada segundo a direção longitudinal do compósito, tal como se mostra na Figura 2.13.

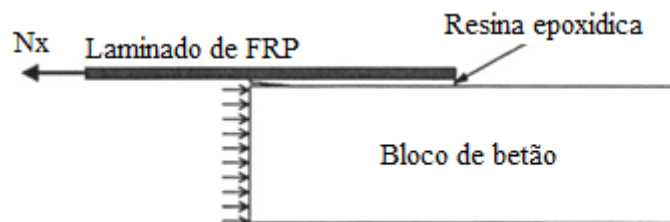


Figura 2.13. Ensaio de corte direto [8].

Geralmente os compósitos são colados numa das faces de provetes de betão, esses provetes podem ser cúbicos com uma aresta de 15 cm ou então com um dos lados mais alongado. Na colagem das fibras deve ser deixando livre um comprimento suficiente para que possam ser ligados a um equipamento mecânico que aplica a força e mede os resultados obtidos. Existem ainda alguns casos em que o compósito é colado em duas faces do bloco como se pode verificar na Figura 2.14, sendo neste caso o ensaio apelidado de corte duplo (*Double-Shear-test*).

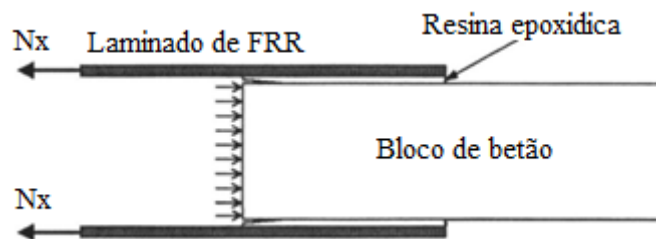


Figura 2.14. Ensaio de corte duplo [8].

### 2.6.3 - Peel test

Este ensaio tem a particularidade de necessitar que o material onde é aplicada a força seja flexível.

A preparação deste método de ensaio é idêntica ao do ensaio de corte. A grande diferença neste caso é que a força não é aplicada segundo a direção longitudinal do FRP mas sim segundo um ângulo de  $90^\circ$  com o plano do FRP [3].

Existem vários métodos diferentes de realizar este ensaio. Por exemplo aplicando a carga numa das extremidades do laminado de FRP (Figura 2.15), no meio do laminado com apoio de uma barra colocada sob este, e ainda na extremidade do FRP mas utilizando o apoio de um rolo deslizante, tal como se pode ver na Figura 2.16.

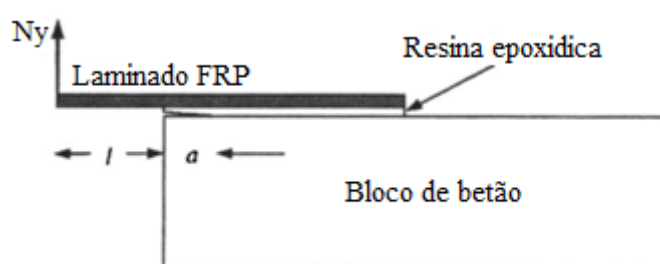


Figura 2.15. *Peel-test* [8].

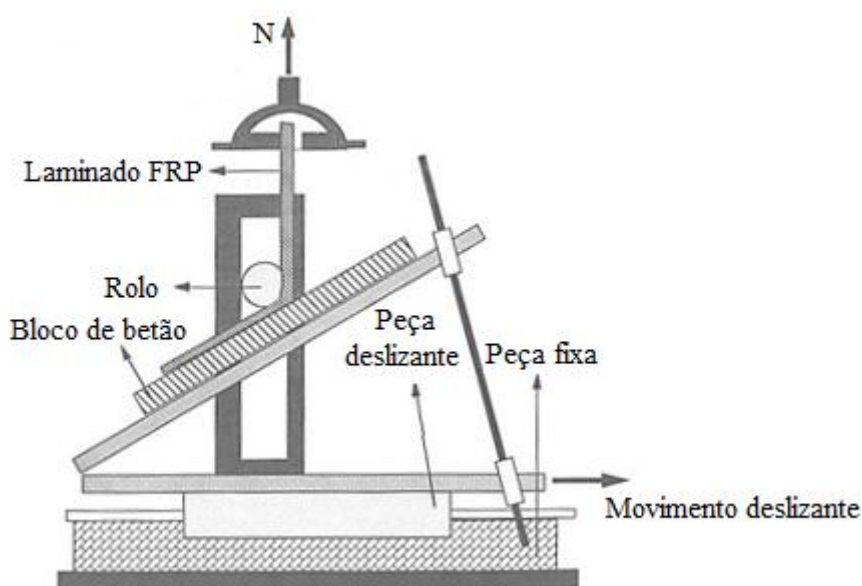


Figura 2.16. *Peel-test* com rolo deslizante [47].

Segundo Karbhari, e Engineer [47], para a realização do ensaio representado na Figura 2.16 tem de se colocar o conjunto betão-FRP firmemente fixado à placa metálica que desliza na base do

equipamento para que não se criem tensões de tração no interior do provete de betão, o que provocaria fissuras e afetaria os resultados. Este ensaio fornece uma boa estimativa da energia libertada aquando da rotura entre o betão e o FRP.

#### 2.6.4 - Ensaio de arrancamento direto (*Pull-Off test*)

Neste capítulo é descrito um ensaio de arrancamento direto, também conhecido com ensaio de aderência ou ensaio de *Pull-Off* (ASTM C 1583-04 [4] e EN 1542 [27]), é dada especial atenção a todas as suas características, nomeadamente equipamento, execução e modos de rotura, uma vez que será este o método utilizado na parte experimental deste trabalho.

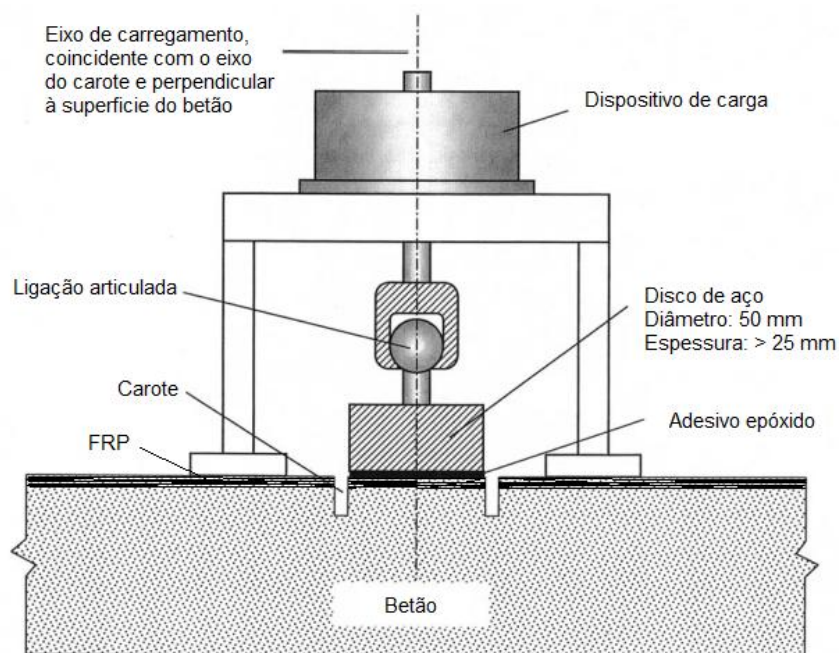
##### *Descrição do ensaio de arrancamento direto*

Este ensaio consiste na medição da resistência à tração perpendicular à ligação ( $f_{ctm,p}$ ) ou seja, a tensão necessária para arrancar uma pastilha metálica (secção circular ou quadrada) previamente colada com uma resina epoxídica ao FRP ou ao betão, consoante a ligação que se queira analisar. O valor da força de tração é medido diretamente no aparelho (Dinamómetro, Figura 2.17), sendo obtida a tensão de arrancamento ( $f_{ctm,p}$ ) dividindo a força de tração na rotura ( $F_t$ ) pela área da secção da pastilha ( $A_p$ ).

$$f_{ctm,p} = \frac{F_t}{A_p} \quad 2.5$$

Alguns aparelhos apresentam imediatamente o valor da tensão uma vez que estão programados para uma determinada secção de pastilha, podendo converter imediatamente a força de arrancamento na tensão. Nesse caso a adoção de pastilhas com uma área diferente da prevista pelo aparelho levará à conversão de valores para ter em conta a pastilha utilizada.

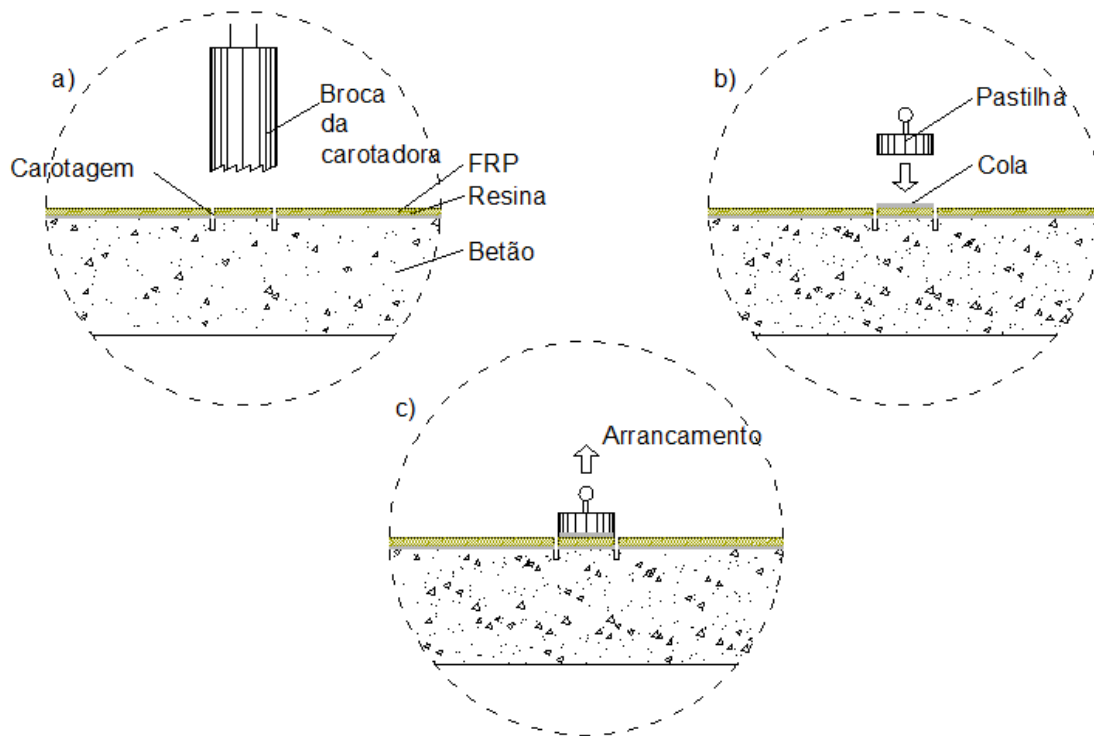
Segundo o Model Code 2010 [16], para os casos de arrancamentos por tração sobre a superfície de betão a tensão de aderência é aceitável se for superior a 1,5 MPa, ou seja, nos casos em que os arrancamentos deem valores inferiores deve-se recorrer a outro tipo de reforço.



Em cima: representação esquemática; Em baixo: imagem do equipamento

Figura 2.17: Dinamómetro para ensaio de aderência

No caso de se estar a efetuar este tipo de ensaio em FRP é fundamental haver carotagem para que as tensões sejam distribuídas apenas pela zona delimitada pelo carote e pastilha, ocorrendo a rotura na zona pretendida. Este procedimento é descrito esquematicamente na Figura 2.18.



a) Abertura do carote; b) Colagem da pastilha; c) Arrancamento da pastilha.

Figura 2.18 - Procedimento do ensaio de arrancamento direto

O ensaio de arrancamento direto é provavelmente o ensaio mais utilizado *in-situ* para avaliar a aderência entre betão e outros materiais, por exemplo rebocos ou materiais de reforço colados com adesivos, como os compósitos de FRP.

Segundo Colen et al.[17] este método apresenta as seguintes vantagens:

- Dinamómetro tem um custo médio (entre 500 € e 2500 €);
- Utilização relativamente fácil, pois os equipamentos são em geral leves, portáteis e de fácil manuseamento;
- Permite obter informação sobre aderência e sobre a sua evolução em condições de serviço;
- Fácil interpretação dos resultados;
- Resultados fiáveis;
- Não necessita de trabalho laboratorial.

A mesma fonte [17] apresenta também as seguintes desvantagens:

- Existe uma pausa na realização dos ensaios; primeiro é preciso colar as pastilhas e só quando a cola curar é que se pode realizar o ensaio, existindo por vezes a necessidade de esperar mais de 3 dias para fazer o arrancamento;
- É uma técnica destrutiva, pelo que necessita sempre de trabalhos de reparação;
- Recomenda-se que o técnico tenha alguma formação específica;

### ***Modos de rotura***

Segundo o Model Code 2010 [16] e Juvandes [45], os modos de rotura nos ensaios de arrancamento direto podem resumir-se a 5 tipos diferentes (Figura 2.19):

- Modo 1: Destacamento pelo betão;
- Modo 2: Rotura parcial pelo betão e descolagem na interface adesivo-betão;
- Modo 3: Destacamento pela superfície de interface betão-adesivo;
- Modo 4: Destacamento pelo adesivo ou pela superfície de interface adesivo-FRP;
- Modo 5: Destacamento pela cola da pastilha.

No caso da rotura acontecer pelo betão (modo 1), ou por uma das superfícies de contacto, (modo 3 e modo 4) deverá adotar-se o valor obtido pelo dinamómetro como limite mínimo para a resistência da ligação. Caso a rotura ocorra, uma parte pelo betão ou adesivo e a outra pela interface de ligação (modo 2) é porque a resistência à tração dos dois é semelhante; neste caso o valor obtido é considerado como um valor médio de aderência [45]. O modo de rotura 5 acontece apenas nos casos em que o ensaio seja mal executado, por exemplo por má colagem das pastilhas.



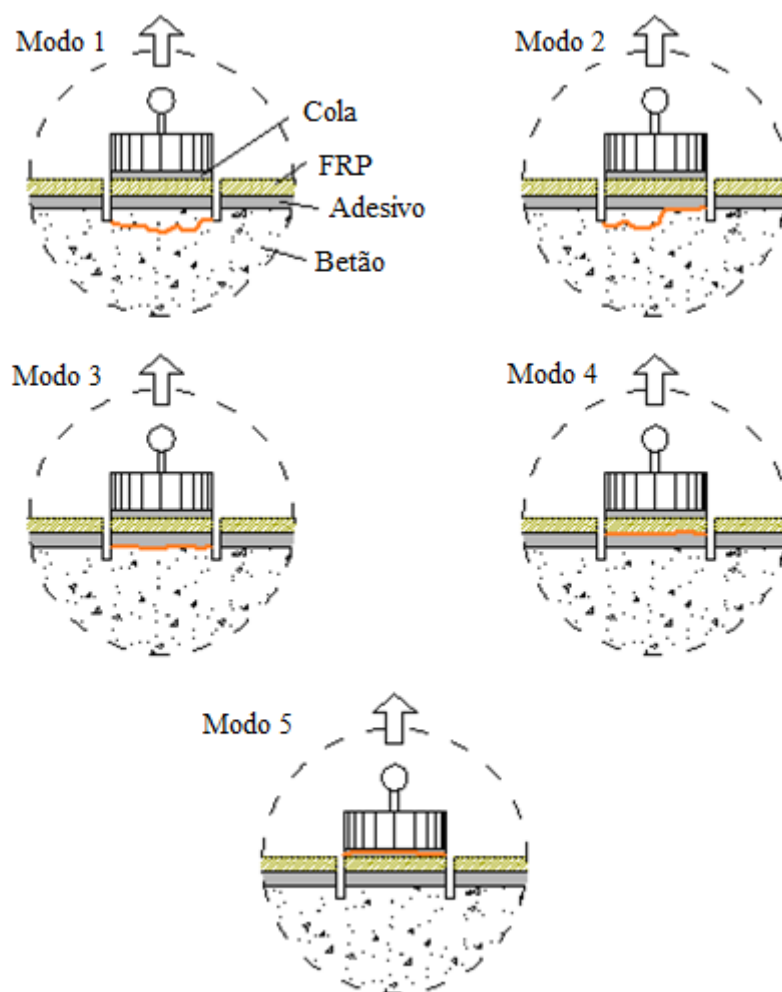


Figura 2.19 - Diferentes modos de rotura num ensaio de arrancamento direto.

A ocorrência de um destes modos de rotura vai depender de vários fatores, relacionados com os materiais, com a sua aplicação e com a forma como o ensaio é realizado.

Alguns procedimentos incorretos na aplicação do reforço de FRP podem provocar algumas destas roturas de forma prematura. Por exemplo, a ausência de tratamento e de limpeza da superfície do betão pode levar a que o segundo modo de rotura, destacamento pela interface betão-adesivo, ocorra de forma prematura; a não inspeção do betão superficial, ou aplicação de reforço em betões de classe muito baixas pode levar ao destacamento pelo betão; a falta de respeito pelo “*pott life*”, as condições atmosféricas adversas, a presença de humidade entre outros fatores que dependem das recomendações dos fornecedores, podem levar a um mau desempenho do adesivo, podendo ocorrer aí o destacamento.

Segundo Juvandes [45] o valor obtido pelo ensaio de arrancamento direto depende dos seguintes fatores:

- Estado de deterioração do betão;
- Classe do betão, (Ribeiro et. al. [53] recomenda que apenas se reforcem estruturas com materiais compósitos de FRP no caso em que as estruturas sejam constituídas por um betão de classe superior à C12/15);
- Tipo de adesivo utilizado na colagem das pastilhas; a capacidade resistente à tração do adesivo pode ditar o modo de ruína;
- Aplicação ou não de primário na superfície betão, primário esse que pode ser uma camada de resina epoxídica ou então um material adequado a esta finalidade;
- Tipo de tratamento de superfície do betão;
- A profundidade do carote;

A experiência do operador neste tipo de ensaios é também um parâmetro importante pois é necessário cuidado com a nivelção do dinamómetro, e aplicar uma carga aproximadamente constante.

Segundo a Concrete Society [18]; o valor da resistência à tração do betão dado pelo ensaio de arrancamento direto, no caso do modo de rotura ser o primeiro, ou seja, pelo betão, pode ser estimado a partir da resistência à compressão do betão em cubos pela expressão 2.6

$$f_{ctm,p} = 0,18 \times (f_{cm})^{\frac{2}{3}} \quad 2.6$$

## **Capítulo 3 - Trabalhos experimentais analisados**

Nesta secção são apresentados alguns dos trabalhos analisados que visam complementar o conhecimento sobre os vários tipos de ensaios apresentados anteriormente e ainda sobre a influência do tratamento de superfície e dos envelhecimentos acelerados na ligação FRP-betão. Os trabalhos apresentados de seguida são:

- Toutanji e Ortiz (2001) [59]
- Au et al (2005) [8]
- Eketel (2005) [25]
- Biscaia (2006) [12]
- Myers (2007) [50]
- Bissonnette (2009) [13]
- Benzarti (2010) [11]

### 3.1.1 - Toutanji e Ortiz (2001)

Toutanji e Ortiz [59], realizaram alguns provetes com um betão com um rácio cimento:areia:brita:água de 1:2:3:0.5 respetivamente, betão com capacidade resistente à compressão de 38 MPa. Aos provetes foram conferidos dois tipos de tratamento de superfície diferente: jacto de água e decapagem com rebarbadora. Os provetes foram reforçados com materiais compósitos de fibras, alguns com fibras de vidro (GE), outros de carbono neste caso dois diferentes tipos de fibras de carbono (C1 e C5), colados com uma resina epóxi.

Os provetes foram submetidos a ensaios de corte duplo, Figura 3.1. Os autores utilizaram apenas um prisma onde os laminados de compósitos foram colados. Para garantir a exequibilidade do ensaio tomaram atenção a dois aspetos aquando da betonagem dos provetes: para garantir rotura do betão a meio do provete quando este for tracionado foi colocado a meio dos moldes uma cunha de forma a formar uma pequena diminuição da área de betão nesse local; para que se pudessem transmitir as cargas aos provetes foi colocada uma barra de aço em cada extremidade com algum comprimento fora do betão.

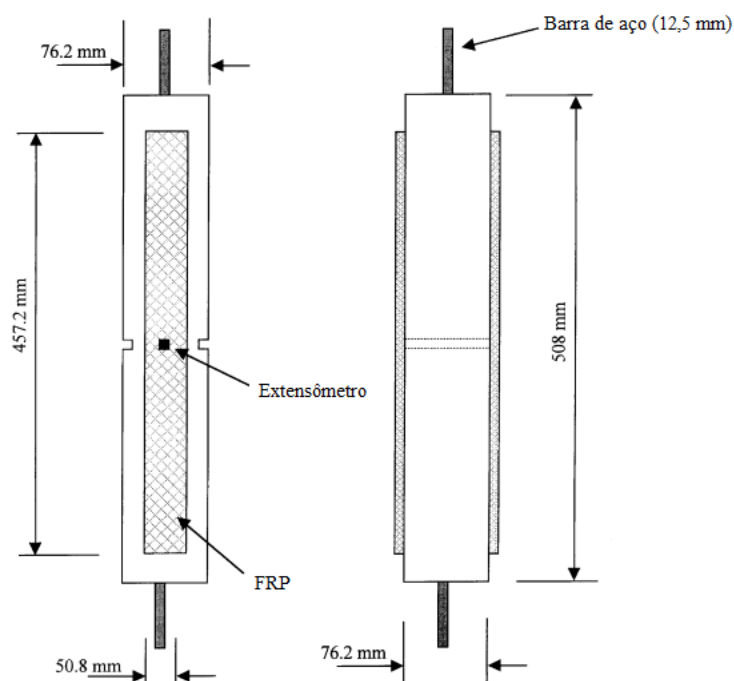


Figura 3.1- Esquema dos provetes de ensaio de corte duplo [59].

Após realizados os ensaios os autores chegaram a cargas de rotura 50% maiores para os provetes tratados com jacto de água (Figura 3.2).

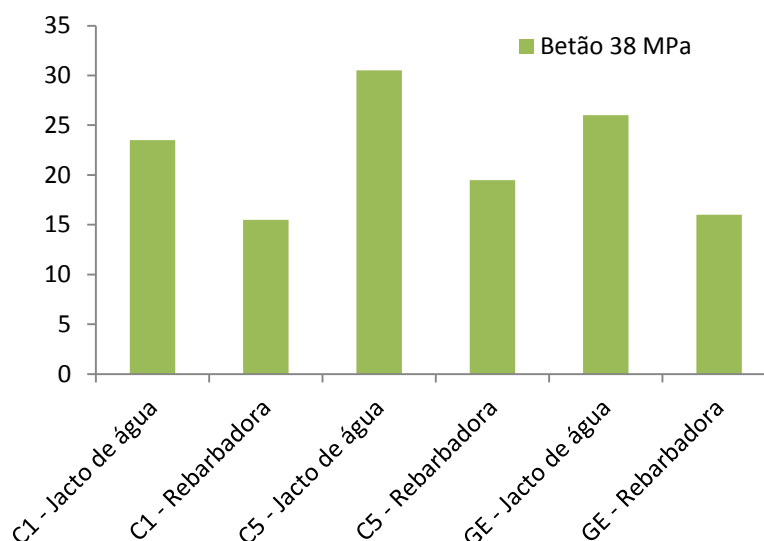


Figura 3.2- Comparação entre a carga de rotura obtida para tratamento com jacto de água e com rebarbadora [59].

Os autores concluíram que os métodos mais agressivos, neste caso o jacto de água, por provocarem uma rugosidade e uma maior exposição do agregado, seriam os mais apropriados para tratar a superfície do betão

### 3.1.2 - Au et al (2005)

Au et al [8] realizaram ensaios de *Pell* e ensaios de corte direto em vários provetes com o objetivo de melhor entender o efeito da humidade na ligação entre o CFRP e o betão. Os materiais utilizados nesse estudo incluem um betão composto por cimento, areia, brita e água misturados com um rácio de 1.0:2.4:1.6:0.5, um compósito de CFRP com espessura de 1,28 mm com módulo de elasticidade de 146 GPa e resistência máxima de 2,7 GPa. Para unir os dois materiais foi utilizada uma resina epoxídica com módulo de elasticidade e resistência máxima de 1,5 GPa e 23 GPa respetivamente.

Tanto os modelos para *peel-test* como os de corte direto apresentam geometrias semelhantes. Na Figura 3.3 pode-se verificar todas as dimensões dos provetes utilizados.

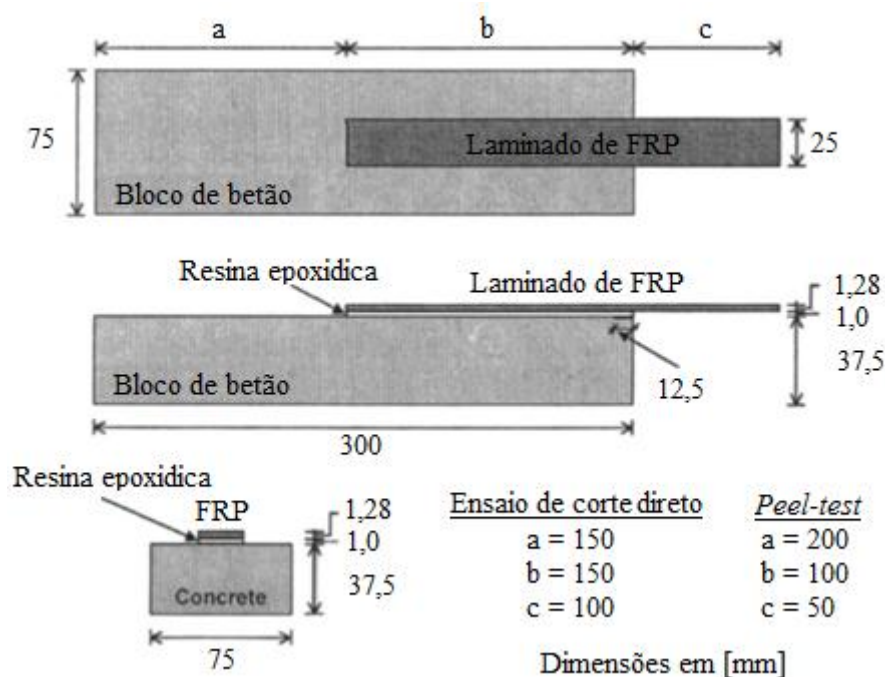


Figura 3.3. Provetes utilizados no ensaio de Peel e no ensaio de corte direto por Au et al [8].

A superfície de betão dos provetes foi tratada; aumentou-se a rugosidade e deixou-se visível algum agregado mais grosso; por fim toda a sujidade existente foi removida por meio de ar comprimido.

Os provetes foram divididos em dois grupos, um grupo para ensaios a temperatura de 23°C e outro a 50°C. Em cada um destes grupos fizeram-se ainda subgrupos, correspondentes ao facto de existir ou não humidade e também porque em cada caso se realizaram os dois tipos de ensaios referidos. Cada um destes subgrupos foi ainda ensaiado às 0, 2, 4 e 8 semanas.

Os modos de rotura observados nos vários ensaios variaram essencialmente com a alteração da humidade nos provetes. No caso do *peel-test* todos os provetes em estado seco romperam por tração no betão; no caso dos provetes húmidos a rotura deu-se na interface epóxi-betão, e neste caso apenas algumas pequenas partículas de betão foram removidas juntamente com o laminado compósito. Relativamente aos ensaios de corte direto, a rotura deu-se com uma rápida propagação. No geral o modo de rotura no ensaio de corte direto foi idêntico ao do *Peel-test*, ou seja, rotura por tração no betão no caso seco, e rotura pela interface epóxi-betão no caso dos húmidos.

Na Figura 3.4 pode-se observar um típico gráfico de *Peel-test*, um gráfico carga-deslocamento, relativo aos resultados obtidos pelos autores, enquanto na Figura 3.5 estão representados os valores obtidos para o ensaio de corte direto.

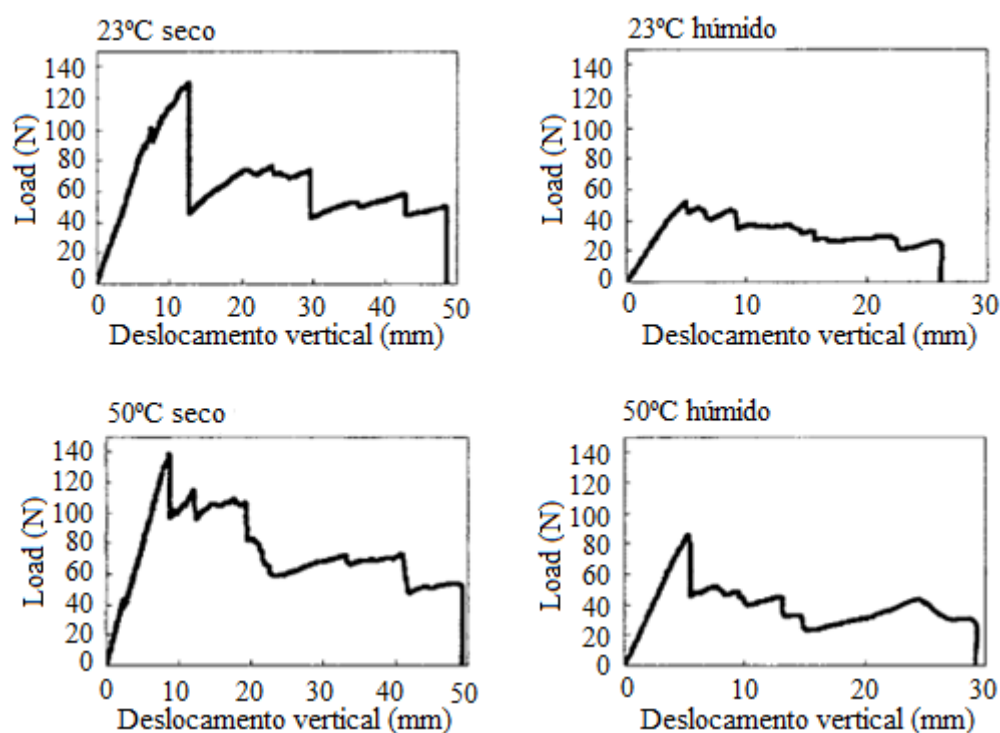


Figura 3.4. Curvas de força aplicada vs. deslocamento obtidas por Au et al [8].

Note-se que os valores das cargas de rotura obtidas tanto pelo *Peel-test* como pelo ensaio de corte direto diminuiram no caso em que existia humidade.

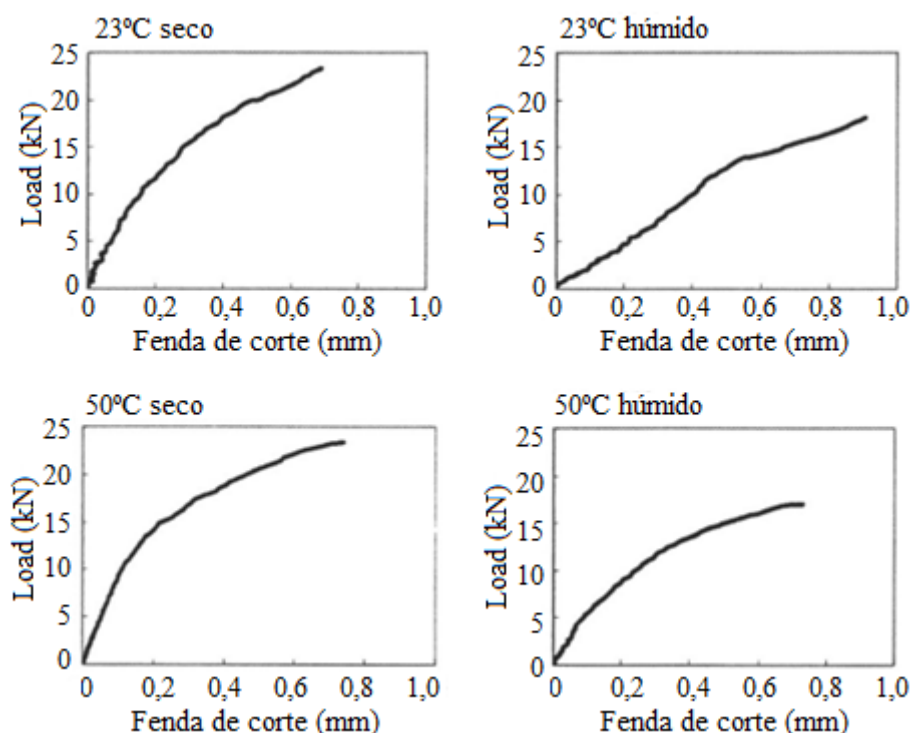


Figura 3.5. Curvas de força aplicada vs. deslocamento obtidas no ensaio de corte simples por Au et al [8].

Os resultados mostraram que o efeito da humidade na ligação FRP-betão é algo complexo pois provoca alterações físicas não só na ligação entre os materiais mas também nos próprios materiais. Os autores salientam que o estudo realizado se concentra apenas num tipo de resina epóxi e que existem algumas resinas epoxídicas especiais que apresentam bons resultados aquando da presença da humidade, por exemplo os epóxios utilizados em situações subaquáticas.

### **3.1.3 - Eketel (2005)**

Ekenel et al. [25], realizaram testes de arrancamento direto e de torção em vários provetes de betão com sistemas de compósitos diferentes e com o objetivo de estudar a importância de 3 fatores na aplicação de materiais compósitos em betão: humidade contida na superfície do betão, humidade reativa do ar e temperatura ambiente.

Foram betonados vários provetes em betão com dimensões 152 mm x 152 mm x 610 mm. Os betões foram ensaiados aos 28 dias obtendo-se uma capacidade resistente à compressão de 44,8 MPa. Após completada a cura os provetes foram “reforçados” com tecido de CFRP de dimensões 140 mm x 584 mm, cobrindo assim 88% de uma das faces do provete. Dois diferentes sistemas de reforço



foram utilizados, designados *Sistema M* e *Sistema T*. As propriedades destes sistemas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Propriedades do Sistema M e do Sistema T [25].

Material	Resistência máxima à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Extensão máxima [%]
Sistema M	3792	227,5	1,67
Sistema T	990	78,6	1,26

Em cada um dos provetes foram realizados 8 carotes, três para ensaio de arrancamento direto e três para ensaio de torsão (Figura 3.6).

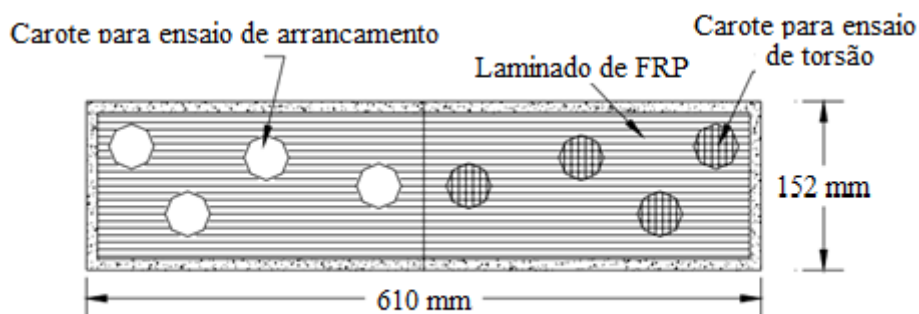


Figura 3.6. Esquema dos provetes reforçados com CFRP utilizados para os ensaios de superfície [25].

Os autores realizaram alguns ensaios onde fizeram oscilar a humidade na superfície do betão entre os 5,05% e os 3,37%. Para análise da influência da humidade relativa do ar fizeram oscilar este parâmetro entre os 98% e os 65%, e por fim realizaram ensaios para analisar a influência da temperatura ambiente e neste caso fizeram os valores variar entre os -7°C e os 49°C.

Dos ensaios realizados tiraram as seguintes conclusões:

- Nos provetes em que a humidade da superfície era de 5,05% obtiveram-se resultados muito pobres no ensaio de arrancamento direto. Os melhores resultados relativamente à

humidade de superfície foram obtidos para os provetes em que esta era de 4,3% ou inferior.

- Para uma humidade relativa durante a instalação de 65% foram obtidos os melhores resultados. No entanto, todos os ensaios realizados com humidade relativa do ar inferior a 82% exibiram resultados satisfatórios para os dois sistemas de reforço utilizados, concluindo-se então que não é aconselhável a aplicação de reforços deste tipo em condições ambientais que não estas.
- As baixas temperaturas afetaram ambos os sistemas FRP aplicados. As temperaturas mais altas não afetaram significativamente nenhum dos sistemas, no entanto acima dos 32°C o tempo de trabalhabilidade reduziu de forma acentuada.

Baseados nas observações efetuadas conclui-se que: os sistemas de FRP utilizados não devem ser instalados quando se verifica uma humidade superficial superior a 4,3%; quando existe uma humidade relativa do ar superior a 82%; deve-se ainda proceder à instalação dos sistemas de FRP quando as temperaturas estão compreendidas entre os 4°C e os 49°C, tendo sempre em atenção que para temperaturas superiores a 32°C o tempo de trabalhabilidade diminuirá acentuadamente.

#### **3.1.4 - Biscaia (2006)**

Biscaia [12], realizou uma série ensaios à flexão e ensaios de arrancamento direto, tendo submetido os provetes a envelhecimentos em ambientes de natureza marítima, de total imersão em água salgada, de ciclos de marés e de nevoeiro salino.

Os ciclos de marés realizados consistiam em 3 dias de total imersão e em seguida 4 dias de secagem, em ambiente laboratorial, repetindo-se o ciclo ao fim dos 7 dias. A salinidade adotada para substituir a água do mar foi de 5% de NaCl, para acelerar os efeitos.

Os envelhecimentos nas lajetas foram feitos em duas fases, uma inicial de 5.000 horas e a segunda até às 10.000 horas tendo-se realizado 6 ensaios após a primeira fase e 7 após a segunda. Praticamente todos os ensaios causaram destacamentos no betão. Apenas em 2 realizados às 5.000 horas o destacamento ocorreu na interface betão-resina.

Tabela 3.2 – Resultados obtidos em ensaios de arrancamento direto [12].

Tensão Máxima [MPa]	Tensão Mínima [MPa]	Tensão Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]	Variância [MPa]	Intervalo de Confiança a 5% [MPa]
Ensaio de Referência – 0 horas – 16 Ensaios realizados					
4,56	3,66	4,09	0,27	0,07	±0,13
Ciclo de marés – 5.000 horas – 6 ensaios realizados					
3,68	2,97	3,32	0,26	0,07	±0,21
Ciclo de marés – 10.000 horas – 7 ensaios realizados					
3,86	2,85	3,39	0,33	0,11	±0,24

Dos valores apresentados na Tabela 3.2 constata-se que houve um decréscimo na tensão média de arrancamento nos ensaios efetuados após as 10 000 horas de envelhecimento. Verifica-se ainda que, com um intervalo de confiança de 5% o menor valor da tensão de arrancamento para os ensaios de referência às 0 horas (4,43 MPa) é superior ao maior valor dos envelhecimentos acelerados (às 5.000 horas: 3,89 MPa; às 10.000 horas: 4,10 MPa).

### 3.1.5 - Myers et al (2007)

Myers et al [50] apresentam um trabalho laboratorial em que realizam dois tipos de ensaios para análise da importância do nível de rugosidade imposta à superfície do betão e também da capacidade resistente do betão utilizado. Os ensaios utilizados pelos autores são o ensaio à flexão, que realizam numa série de vigas em T, e ensaios de corte duplo (*Double Shear test*).

Para a realização dos ensaios de corte duplo foram betonados duas séries de provetes, a primeira série com betão de capacidade resistente à compressão de 41,1 MPa (Concrete 2) e o segundo com 55,2 MPa (Concrete 3). A superfície dos blocos foi tratada com jacto de água, tendo sido conferidas diferentes rugosidades que foram medidas com o apoio de um laser de perfilometria, método descrito por Maertz et al [48]. A partir deste método obtém-se o parâmetro  $i_A$ , sendo a rugosidade da superfície definida segundo os autores como pouco rugosa (valores de  $i_A$  inferiores a 10), rugosidade média ( $10 < i_A < 14$ ) e muito rugosa ( $i_A > 14$ ).

Para cada ensaio de corte duplo foram ligados dois cubos de betão através de CFRP unidirecional colado em duas faces opostas dos cubos. As tiras de GFRP foram reforçadas com uma tira transversal do mesmo material, mas apenas num dos cubos, isto para que a rotura ocorresse apenas naquele que seria monitorizado (Figura 3.7). Para a aplicação das cargas foi utilizado um macaco hidráulico e uma célula de carga e através de extensómetros um dos cubos foi monitorizado durante o carregamento.

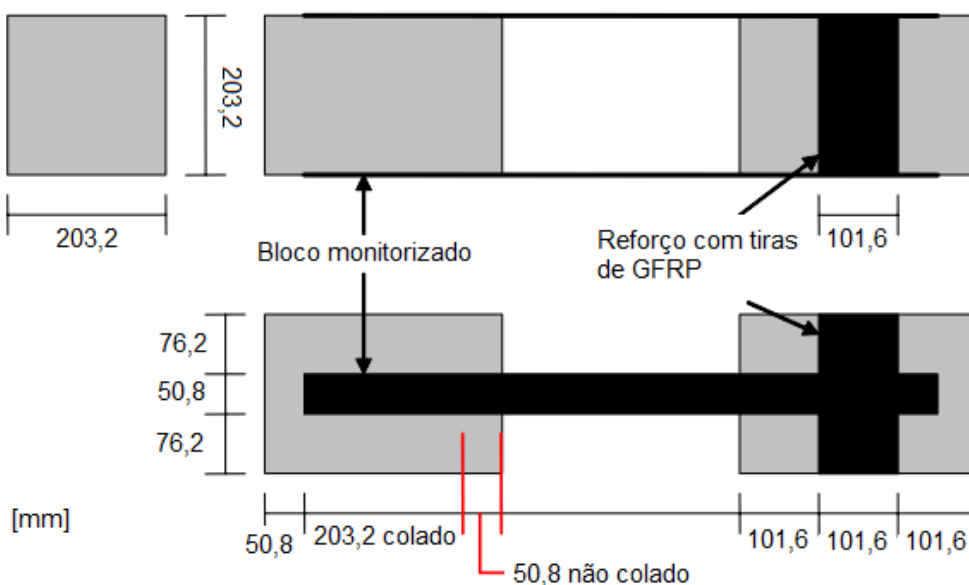
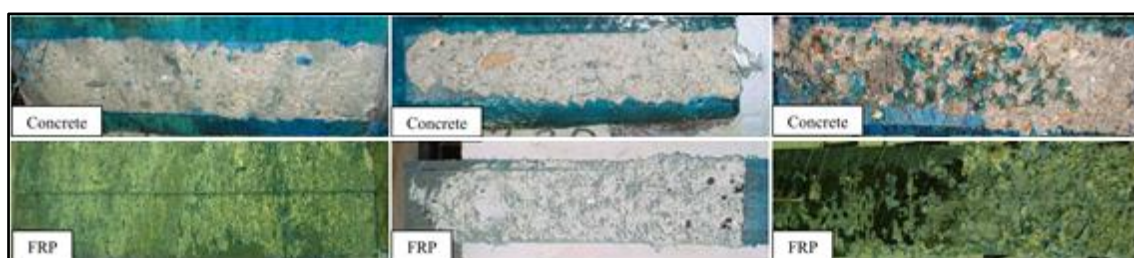


Figura 3.7: Modelo de ensaio utilizado por Myers et al, imagem adaptada de Myers et al [50].

Alguns ensaios apresentaram diferentes modos de rotura, com diferentes quantidades de betão coladas ao FRP. Na Figura 3.8 pode-se verificar que com o aumento da rugosidade a quantidade de betão que fica colada ao FRP vai aumentando também.



Pouca rugosidade (esquerda), média (centro) e elevada (direita) [50].

Figura 3.8: Interface betão-FRP após o ensaio de corte com diferentes rugosidades.

No projeto de reforço ao esforço transversal o ACI 440 [2] recomenda que a extensão máxima no FRP ( $\varepsilon_{fe}$ ) seja calculada minimizando a extensão última ( $\varepsilon_{fu}$ ) com um coeficiente de minoração  $K_v$  e devendo ser limitada a 0,004 (3.1).

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fu} \times k_v \leq 0,004 \quad 3.1$$

O coeficiente de minoração ( $K_v$ ) é um parâmetro que varia conforme o tipo de confinamento utilizado.  $K_v=0,15$  no caso em que o confinamento é total (Figura 3.9), mas nos casos em o reforço se faz apenas em duas ou três faces este coeficiente pode ser menor, sendo calculado pela expressão 10-7 do ACI 440 [2].



Figura 3.9: Modos típicos de reforço ao esforço transversal [2].

Um dos estudos realizados pelos autores esteve relacionado com o cálculo experimental do coeficiente de segurança ( $K_{exp}$ ), ou seja, sabendo-se a extensão última ( $\varepsilon_{fu}$ ) e obtendo experimentalmente o valor da extensão na rotura pode-se calcular o valor de  $K_{exp}$ .

Para o caso do betão de 41,1 MPa (Concrete 2) obtiveram uma carga média na rotura de 24,4 kN, e um  $K_{ex}$  médio de 1,7, ou seja mais do dobro do valor do  $K_v$ , que como mostrado anteriormente será no máximo 0,15. No caso do betão de 55,2 MPa (Concrete 3) a carga média na rotura foi de 38,8 kN, e um  $K_{exp}$  de 2,7, ou seja um valor 3,6 vezes superior ao recomendado pelo ACI 440.

Em certos casos aconteceu que a carga na rotura ultrapassou o limite indicado pelo fornecedor apontando a causa como possíveis erros durante os ensaios.

Quanto à rugosidade da superfície, foram registados os maiores valores de carga na rotura nos casos em que a superfície foi tratada com o jacto de água, concluindo que o aumento da rugosidade melhoraria a ligação FRP-Betão. No entanto, para valores de  $i_A$  superiores a 14 o valor das cargas começaria a reduzir.

Os valores de carga obtidos por Myers et al, para o caso em que o parâmetro de rugosidade,  $i_A$ , é superior a 14 devem-se provavelmente à penalização que o betão sofre com métodos de tratamento de superfície muito agressivos, pois, como visto, estes métodos podem criar microfissuras e descolamento do agregado no betão superficial.

### 3.1.6 - Bissonnette et al (2009)

Bissonnette et. al. [13], realizaram duas series de 16 lajes de betão, uma com betão com capacidade resistente à compressão de 25 MPa e a outra com 35 MPa. Através de uns moldes em acrílico, colocados previamente no fundo das cofragens das lajes, foram conferidas imperfeições às lajes de 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm. Após a cura as lajes foram submetidas a diferentes tipos de tratamento de superfície: jacto de areia, jacto de água, escarificadora, jacto com partículas metálicas e martelo pneumático. A rugosidade provocada pelos diferentes métodos utilizados foi caracterizada a partir de um sistema de luzes projetadas de vários ângulos, sobre a superfície. A informação quanto à rugosidade foi recolhida a partir desse sistema de iluminação e um modelo tridimensional da superfície criado digitalmente. Sendo o parâmetro para caracterizar a rugosidade da superfície,  $R_a$ , na Figura 3.10 podem-se observar as diferenças entre a rugosidade obtida pelos vários métodos utilizados.

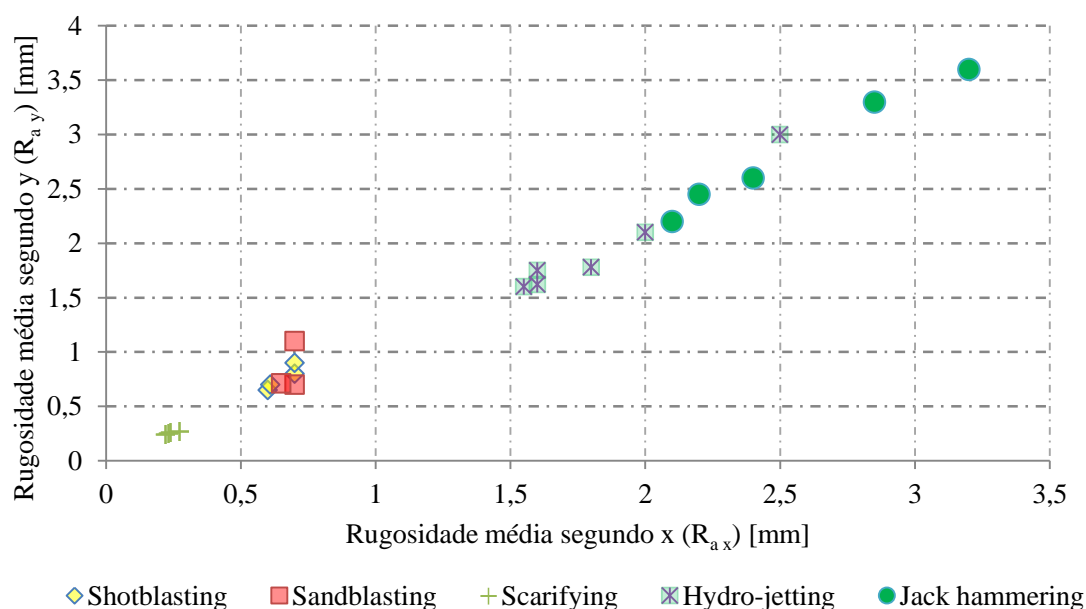


Figura 3.10 – Resultados da rugosidade obtida depois da preparação da superfície com diferentes métodos [13].

A integridade e a capacidade resistente do betão superficial, foram também analisadas. Utilizou-se o esclerómetro, também conhecido por martelo de Schmidt (Figura 3.11).

Quando se pressiona o veio de compressão do esclerómetro contra a superfície de betão a ensaiar, comprime-se uma mola existente no interior do aparelho. Logo que o veio atinge o fim do seu curso, é libertada, instantaneamente, uma massa que choca com a sua extremidade interior. O choque é transmitido à superfície a ensaiar, a qual reage, provocando um ressalto. O mesmo veio transmite esse ressalto à massa móvel, que, ao deslocar-se, faz mover um ponteiro, visível no exterior do invólucro do aparelho, e regista o ponto máximo do ressalto da massa. Quanto mais dura e compacta for a superfície do betão, maior será o ressalto. O valor de referência obtido através da escala do aparelho – índice esclerométrico – permite avaliar o valor da resistência à compressão do betão, tendo em conta o ângulo entre o eixo longitudinal do esclerómetro e a superfície ensaiada.



Figura 3.11 – Esclerómetro [35]

Verificou-se que os métodos mais agressivos nomeadamente o martelo pneumático, provocariam tensões no betão superficial mais baixas, Figura 3.12, concluindo os autores que este facto se deveria a pequenos danos que estes métodos pudessem provocar no substrato de betão [13].

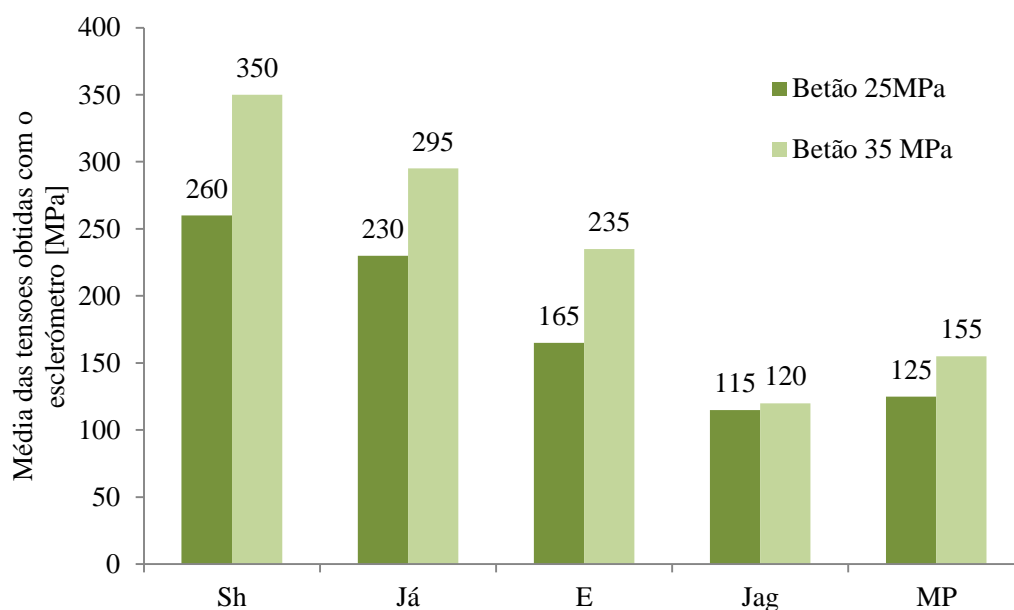


Figura 3.12 - Resultados obtidos com o esclerómetro, para vários tipos de tratamento de superfície [13].

Após os ensaios de caracterização de superfície as lajes foram reforçadas com cerca de 75 mm de betão de 45 MPa ao qual foi misturado um pigmento preto para que ficasse com uma cor distinta do betão das lajes e assim se pudessem diferenciar melhor os dois betões, e verificar com mais certeza onde ocorreria a rotura.

Por fim foram realizados os ensaios de arrancamento direto, Figura 3.13.

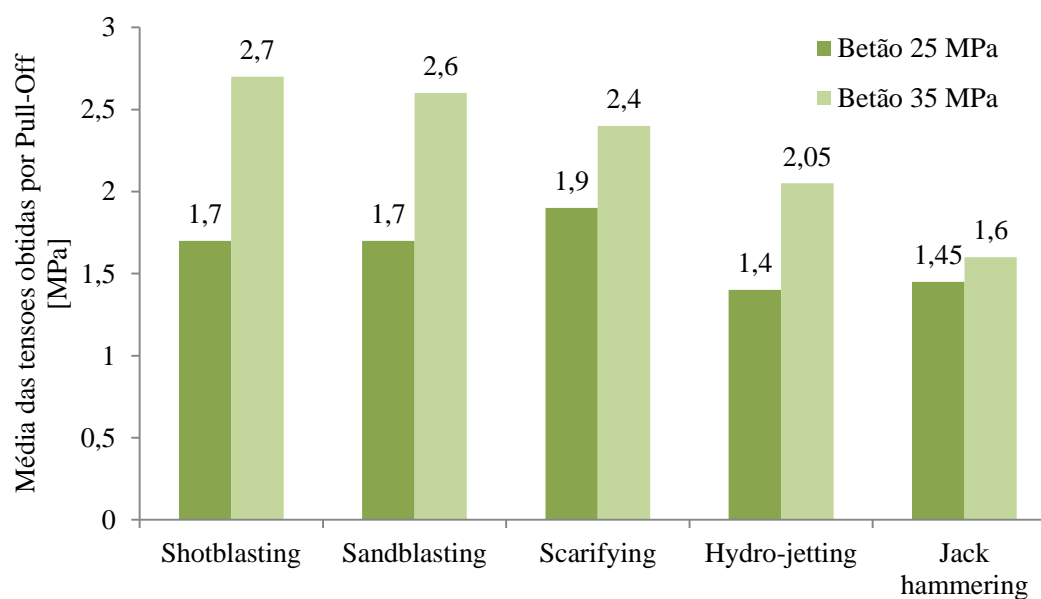


Figura 3.13 - Resultados dos testes de arrancamento direto obtidos para diferentes tratamentos de superfície [13].



Verificou-se que o aumento da rugosidade da superfície do betão melhoram a aderência entre o material existente e o de reforço, que neste caso é um betão de 45 MPa, conclusão à qual chegou também, como já referido, Toujanji e Ortiz [59], apesar de neste último caso o material de reforço ser compósito de FRP. Bissonnette et. al. [13] concluíram também que utilizar métodos muito agressivos, como neste caso o martelo pneumático, introduziria danos no betão, por exemplo microfissuras, e então a vantagem em se ter uma rugosidade maior seria perdida com estes danos. A evolução da tensão com os métodos de preparação de superfície utilizados pode ser observada na Figura 3.14.

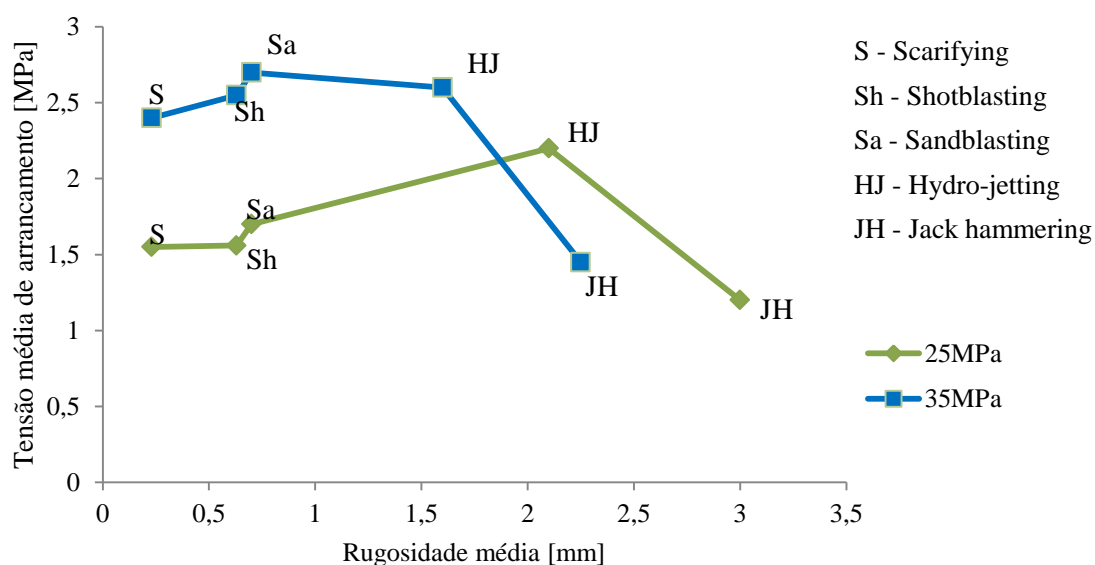


Figura 3.14 - Resultados dos ensaios de arrancamento direto em função do tipo de tratamento de superfície, [13].

### 3.1.7 - Benzarti et al (2010)

Benzarti et. al [11] realizaram uma série de 78 provetes de betão, aos quais aplicaram dois sistemas diferentes de FRP denominados S1 e S2, para cada um também foram adotadas resinas diferentes.. As propriedades de cada um dos sistemas são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades dos sistemas de FRP adotados por Benzarti et. al [11].

Sistemas	Largura [mm]	Espessura [mm]	Módulo de elasticidade [GPa]	Resina adotada
S1	100	1,4	163	Epo 1
S2	80	1,2	165	Epo 2

Os provetes, já depois de concluírem a cura (28 dias), estiveram durante um período de 15 dias em ambiente laboratorial, depois foram colocados numa camara climática para envelhecimento acelerado, (temperatura de 40°C e uma humidade relativa superior a 95%), durante um período de 20 meses (628 dias).

Em cada um dos provetes foram realizados 3 tipos de ensaio, ensaios de corte, de arrancamento Direto e ainda ensaios de compressão (Figura 3.15).

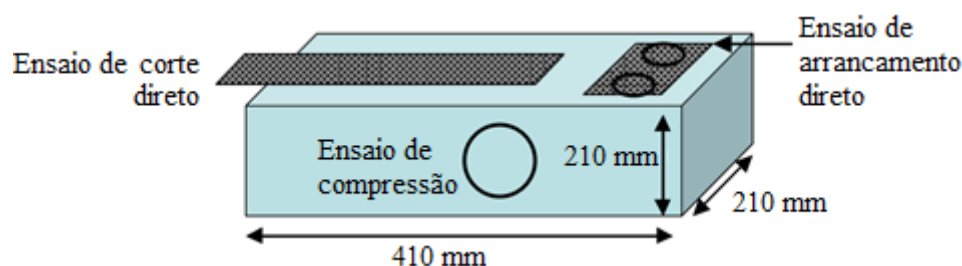


Figura 3.15 – Provetes criados por Benzarti para ensaios de corte, Arrancamento direto e compressão [11].

Periodicamente foram retirados 3 provetes de cada sistema das camaras de envelhecimento e testados para analisar a evolução dos valores da capacidade resistência à compressão do betão e das tensões de arrancamento.

Para melhor conhecer as resinas utilizadas foram criados provetes de adesivo que foram submetidos a envelhecimentos semelhantes tendo-se verificado uma absorção de humidade superior na *Epo I*, e também uma redução drástica da temperatura de transição vítrea,  $T_g$  (Figura 3.16).

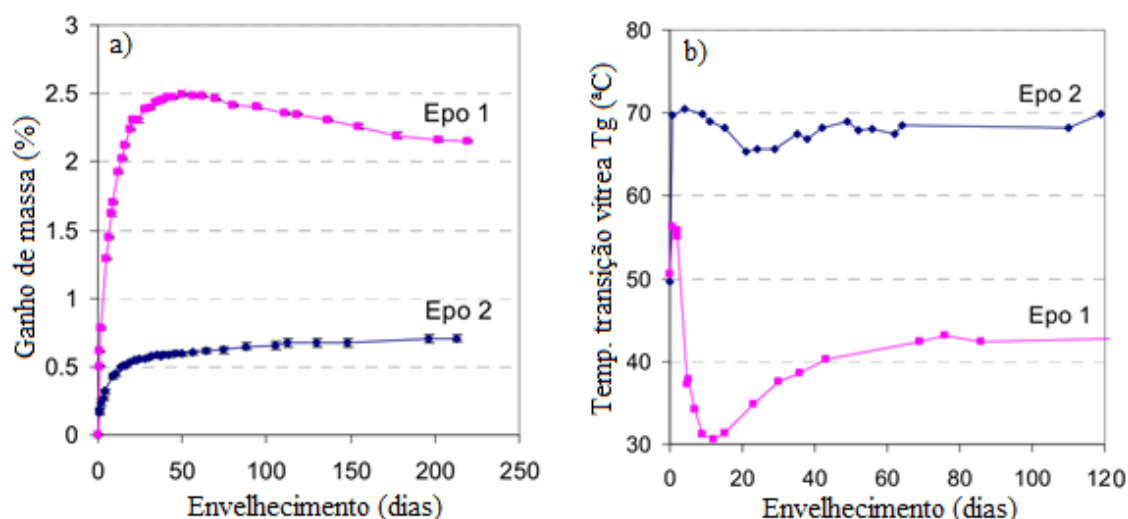


Figura 3.16 – Absorção de humidade ao longo do envelhecimento (à esquerda), evolução do  $T_g$  ao longo do envelhecimento (à direita) [11].

Através de carotes cilíndricos retirados dos provetes determinou-se a capacidade resistente à compressão, tendo evoluído de 30 MPa na fase inicial do envelhecimento para 43 MPa após os 20 meses.

Os ensaios de arrancamento direto revelaram evoluções diferentes nos dois sistemas de FRP. Para o sistema S1 verificou-se uma grande diminuição na tensão de arrancamento, (Figura 3.17).

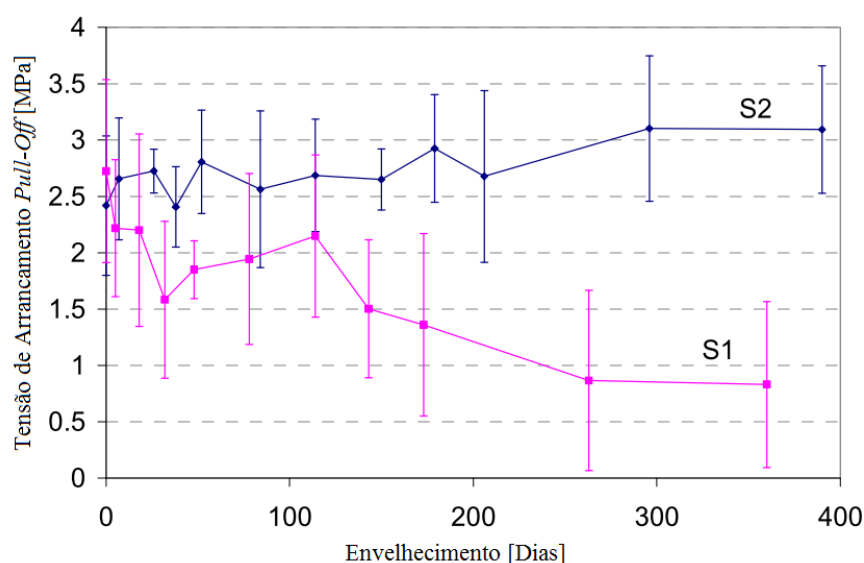


Figura 3.17 – Evolução da tensão de arrancamento direto com o envelhecimento [11].

Ao longo do envelhecimento foi ocorrendo também uma evolução no modo de rotura nos ensaios de arrancamento direto realizados no sistema S1 (Figura 3.18), inicialmente 100% dos ensaios rompiam no betão (modo 1) e ao longo do tempo os descolamentos pelo adesivo iam surgindo cada vez com mais frequência. Para os provetes com o FRP tipo S2 não houve uma evolução significativa quer a nível da tensão de arrancamento quer a nível do modo de ruína.

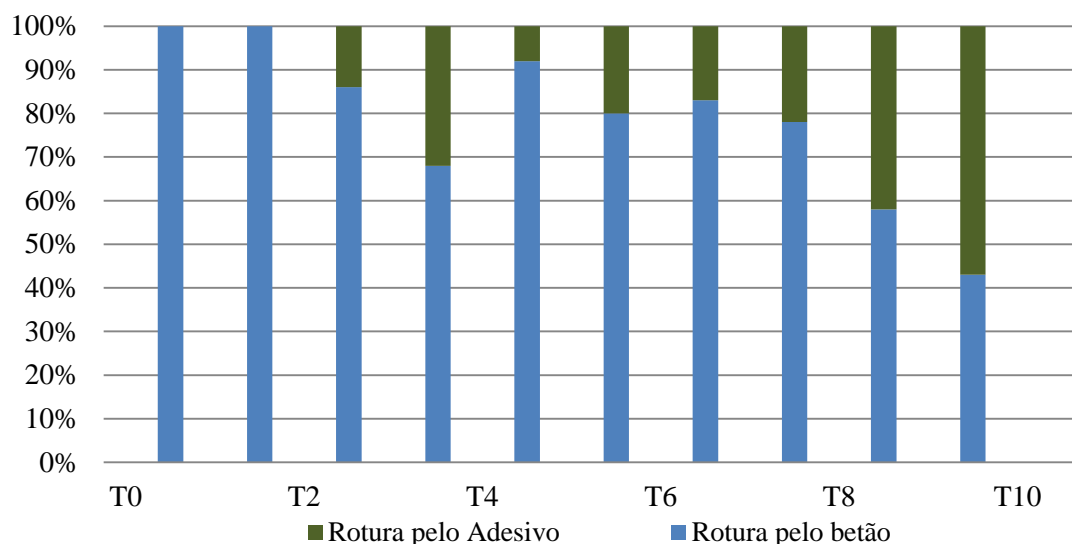


Figura 3.18 - Evolução dos modos de rotura por Arrancamento direto. Provetes tipo S1 (adaptado) [11]

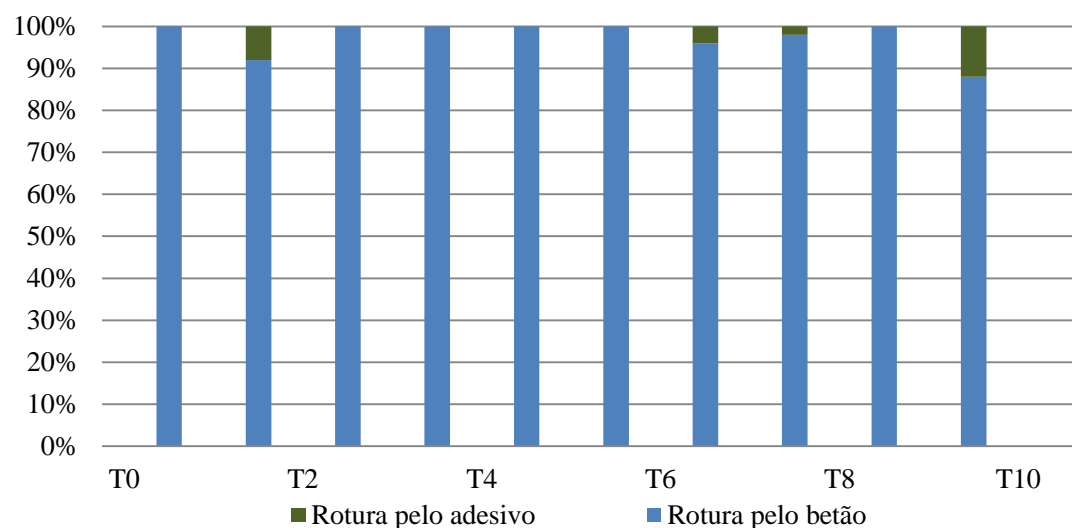


Figura 3.19 - Evolução dos modos de rotura por Arrancamento direto. Provetes tipo S2 (adaptado) [11]

Os ensaios de corte demonstraram que, tanto para o sistema S1 como para o S2 não ocorreu uma alteração significativa na tensão de rotura por corte (Figura 3.20).

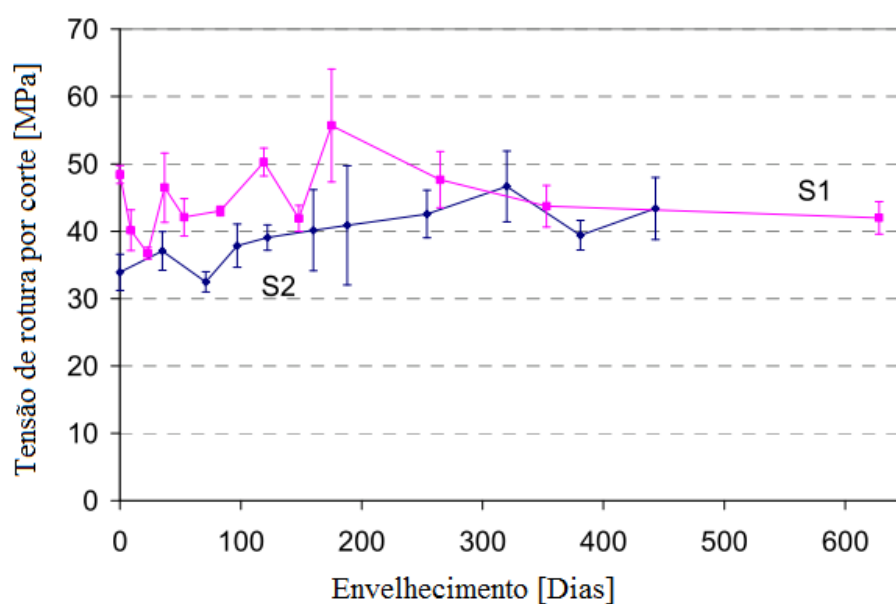


Figura 3.20 – Evolução das tensões de corte ao longo do envelhecimento [11].

Já os modos de rotura neste tipo de ensaio foram evoluindo ao longo do tempo de forma mais acentuada que nos ensaios de arrancamento direto (Figura 3.21). Neste caso o sistema S2 também apresentou uma evolução, registrando-se mais roturas pelo adesivo após os envelhecimentos (Figura 3.22).

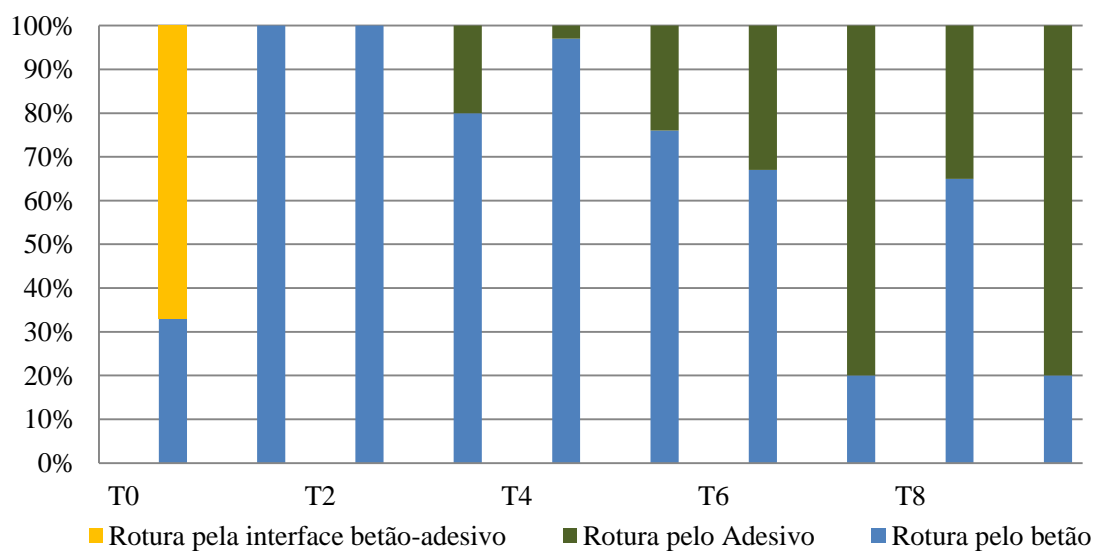


Figura 3.21 - Evolução dos modos de rotura por corte. Provetes tipo S1 (adaptado) [11].

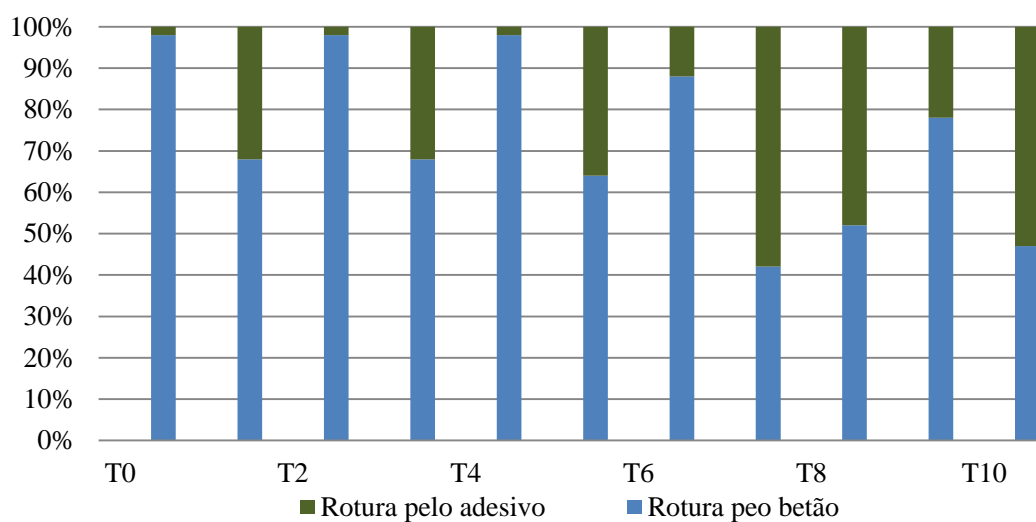


Figura 3.22 - Evolução dos modos de rotura por corte. Provetes tipo S2 (adaptado) [11].

Benzarti et. al [11] verificaram então que os testes de Arrancamento direto apenas registaram uma alteração no modo de ruína para a resina *Epo1* enquanto que o teste de corte apresentou a mesma evolução para os dois tipos de resinas. Posto isto concluíram que nem sempre se podem relacionar os dois testes, e que o teste de arrancamento direto pode ter menor precisão.

## **Capítulo 4 - Aplicação Experimental**

### **4.1 - Introdução**

O trabalho experimental realizado teve como objetivo analisar o comportamento da ligação de um reforço com GFRP ao betão através de uma resina epoxídica. Vários fatores foram analisados, a rugosidade da superfície, a quantidade e dimensão de agregado após a preparação da superfície. Para tal fabricaram-se três lajetas com betões idênticos no rácio entre os seus constituintes, existindo entre cada um deles apenas uma diferença: a dimensão dos agregados grossos (brita). As lajetas foram sujeitas a diferentes tratamentos de superfície e “reforçadas” com tecido de fibra de vidro. A ligação destes materiais foi analisada a partir de ensaios de arrancamento direto. Um dos aspetos analisados foi o comportamento desta ligação e dos materiais após envelhecimento acelerado. Este envelhecimento, que teve como objetivo simular um ambiente marítimo, mais concretamente o efeito das marés no sistema de reforço, foi realizado nos tanques da FCT. Com o objetivo de acelerar o processo de degradação a água utilizada foi previamente aquecida e mantida aproximadamente a 30 graus Celsius enquanto as lajetas estavam imersas.

## 4.2 - Caracterização dos materiais

Nesta secção, faz-se a descrição dos materiais utilizados na realização dos modelos experimentais utilizados para realizar os vários ensaios necessários ao trabalho de investigação. Como os modelos experimentais eram compostos por betão e GFRP, serão então descritos estes materiais para que se possa, de uma forma mais aprofundada, analisar os resultados obtidos.

### 4.2.1 - Betões utilizados

As lajetas utilizadas neste trabalho foram betonadas no dia 3 de novembro de 2011, no laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Betonaram-se as lajetas e 15 cubos com 150 mm de aresta para realizar ensaios de compressão e avaliar o betão. Todo este processo, produção do betão e betonagem, foi realizado com base na NP EN 206-1 [52], na E 464 [6] e ainda Coutinho [19 e 20].

Para a produção do betão foi utilizado cimento Portland, areia e um agregado grosso e de origem calcária. As curvas granulométricas da areia e do agregado grosso são apresentadas na Figura 4.1, e Figura 4.2 respetivamente.

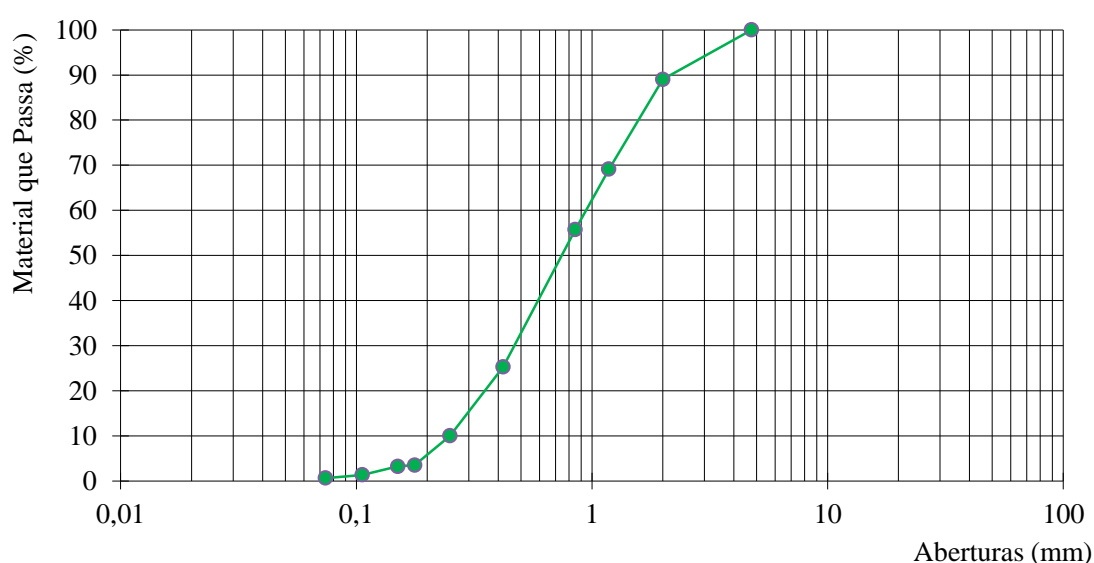


Figura 4.1: Curva granulométrica da areia



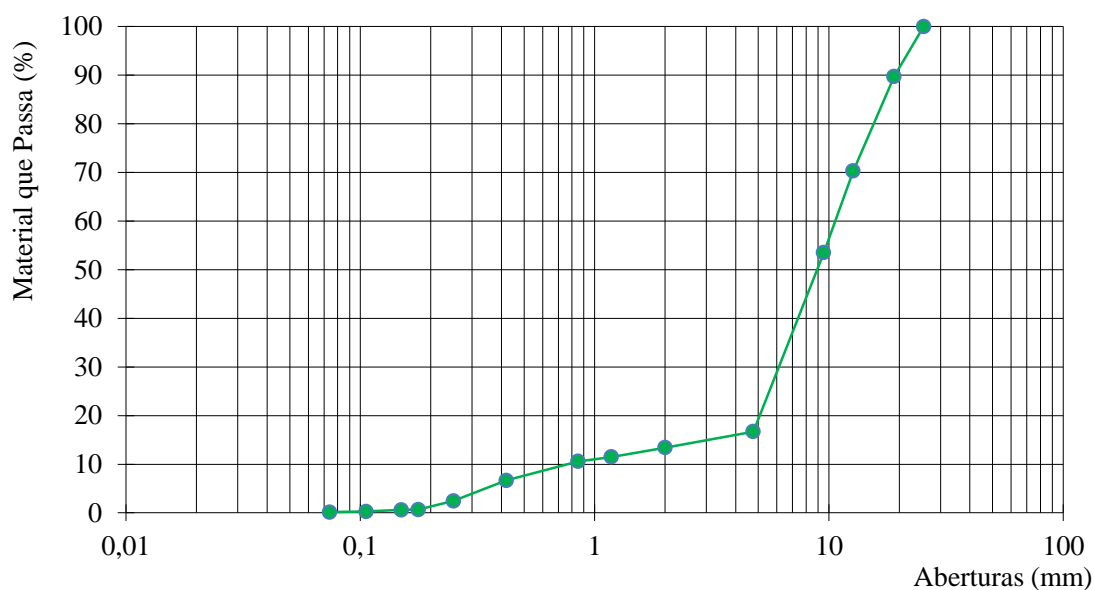


Figura 4.2: Curva granulométrica da brita

Estas curvas granulométricas foram fundamentais para o cálculo da composição do betão uma vez que é indispensável fazer uma mistura tal que ofereça a melhor trabalhabilidade e o mais solido e compacto betão possível. Para este estudo recorreu-se ao método da *Curva de Faury*, com o apoio da publicação de Coutinho [19]. Após realizados os cálculos chegou-se à quantidade de materiais apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Quantidade de material por metro cubico de betão

Materiais	Quantidade / m <sup>3</sup>
Cimento	300 kg
Água	200 litros
Areia	1022 kg
Brita	793,5 kg

Também com o apoio das análises granulométricas dos agregados fez-se uma separação da brita por três tamanhos diferentes, pois como referido anteriormente existia a intenção de após o tratamento de superfície obter rugosidades e tamanho de agregado exposto diferente.

Os provetes cúbicos realizados foram ensaiados numa máquina de compressão uniaxial (Figura 4.3), segundo a NP EN 12390-3 [51], no Laboratório de Ensaio de Betões e Cimentos do LNEC.



Figura 4.3: Máquina de compressão uniaxial (LNEC).

Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.2 tendo sido encontrada a resistência à compressão em cilindros ( $f_c$ ) através da expressão 4.1.

Tabela 4.2: Tensão de compressão dos cubos aos 28 dias.

Identificação do cubo	Diferenças nos materiais do betão	Data de fabrico	Idade (dias)	fc,cube [MPa]	fc [MPa]	fcm [MPa]
G1	Betão com agregados “grandes” (brita > # 1/2")	3/11/2011	28	28,17	22,53	22,71
G2				28,43	22,75	
G3				28,57	22,85	
M1	Betão com agregados “médios” (# 3/8" < Brita < # 1/2")			27,63	22,11	21,79
M2				27,28	21,82	
M3				26,80	21,44	
P1	Betão com agregados “pequenos” (# 4" < Brita < # 3/8")			27,58	22,07	22,13
P2				27,19	21,75	
P3				28,21	22,57	

$$f_c = 0,8 \times f_{c,cube} \quad 4.1$$

Segundo o EC 2 [29] “a tensão de rotura do betão à compressão é designada por classes de resistência do betão relacionadas com o valor característico (quantilho de 5%) da resistência à compressão referido a provetes cilíndrico,  $f_{ck}$ , ou a provetes cúbicos,  $f_{ck,cube}$ , de acordo com a EN 206-1”. Posto isto, para o cálculo do  $f_{ck}$  utilizou-se a 4.2 e obtiveram-se betões da classe C16/20. Seguindo então as expressões 4.3, 4.4 e 4.5 obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.3.

$$f_{cm} = f_{ck} + 4\text{MPa} \quad 4.2$$

$$f_{cm} = 0,8 \times f_{cm,cube} \quad 4.3$$

$$f_{ctm} = 0,3 \times f_{ck}^{\frac{2}{3}} \leq C_{50/60} \quad 4.4$$

$$E_{cm} \geq 22 \times \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad 4.5$$

Tabela 4.3: Características dos betões aos 28 dias, segundo o EC2 [29].

Betão	$f_{cm,cube}$ [MPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$f_{ck}$ [MPa]	$f_{ctm}$ [MPa]	$E_{cm}$ [GPa]
Betão G	28,39	22,71	18,71	2,11	28,14
Betão M	27,24	21,79	17,79	2,04	27,79
Betão P	27,66	22,13	18,13	2,07	27,92

#### 4.2.2 - Compósito GFRP utilizado

O material utilizado para reforçar as lajetas foi um polímero reforçado com fibras, tal como referido anteriormente, à base de fibras de vidro, ou seja um GFRP. O compósito foi produzido a partir de um tecido Tyfo<sup>®</sup> SEH-51 [32]. Este tecido tem como base as fibras de vidro longitudinais 100% direcionadas a 0° e fibras aramídicas direcionadas a 90°, ou seja, perpendiculares às principais, que apenas servem para unir as fibras de vidro e por isso apresentam-se em muito menor quantidade (Figura 4.4).

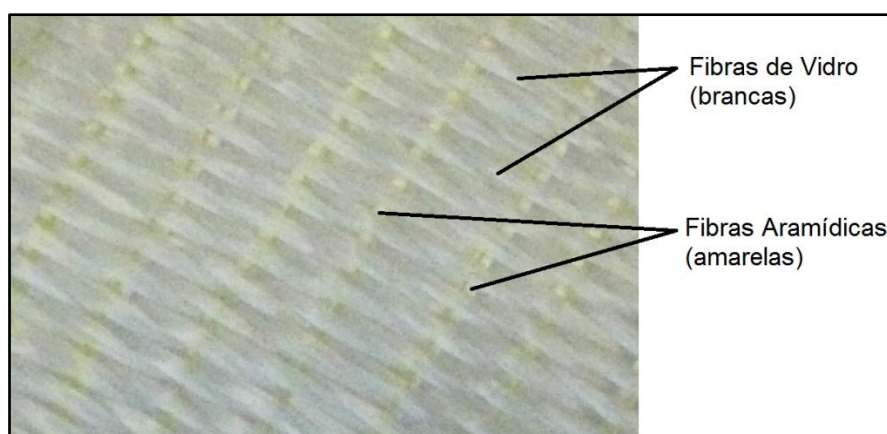


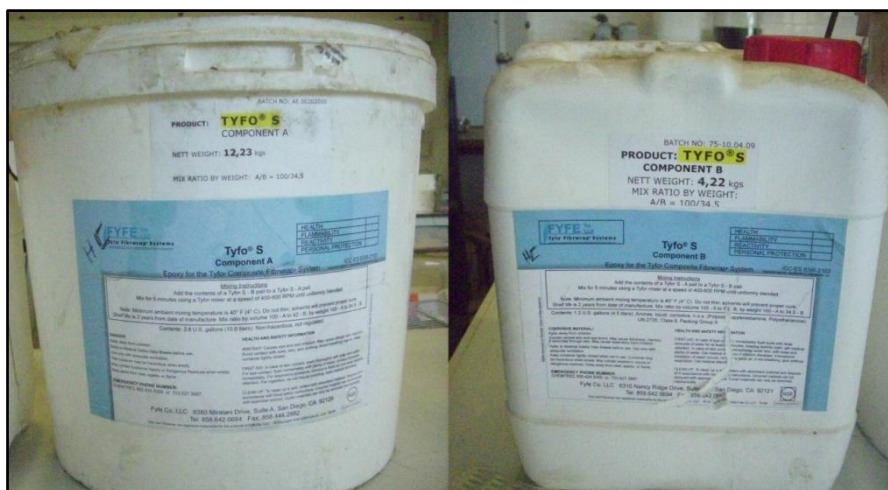
Figura 4.4: Disposição das fibras no tecido Tyfo<sup>®</sup> SEH-51 [32]

As propriedades destas fibras fornecidas pelo fabricante, antes de impregnadas com a matriz são, apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Propriedades das fibras Tyfo<sup>®</sup> SEH-51 [32]

Propriedade	Valor obtido
Tensão de rotura à tração $\sigma_g$	3,24 GPa
Módulo de elasticidade $E_g$	72,4 GPa
Extensão $\epsilon_g$	4,5%
Densidade $\rho_g$	2,55 g/cm <sup>3</sup>
Peso $\gamma_g$	915 g/m <sup>2</sup>
Espessura $e_g$	0,36 mm

A resina utilizada para impregnar as fibras foi uma resina epoxídica tipo Tyfo<sup>®</sup> S Epoxy [32]. Este material é composto por duas componentes, a resina (componente A) e o endurecedor (componente B) tal como se pode ver na Figura 4.5.



Resina (esquerda) e endurecedor (direita).

Figura 4.5: Componentes da Tyfo<sup>®</sup> S Epoxy [32].

A mistura destas duas componentes deve respeitar a relação de 100 partes da primeira para cada 34,5 partes da segunda, sendo estas partes medidas em peso, ou então 100 partes da primeira para cada 42 da segunda no caso de estas serem medidas em volume. O fabricante fornece as características desta resina, que são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Propriedades da resina Tyfo<sup>®</sup> S Epoxy [32]

Propriedade	Norma utilizada na caracterização	Valor obtido
Temperatura de transição vítrea, T <sub>g</sub>	ASTM D-4065 [6]	82°C
Tensão de rotura, $\sigma_r$	ASTM D-638 Type 1 [7]	72,4 MPa
Módulo de elasticidade, E <sub>r</sub>		3,18 GPa
Extensão, $\epsilon_r$		5,0%

Esta resina além de impregnar as fibras foi também utilizada para fazer a ligação destas à superfície do betão e assim transmitir as forças por aderência. Além da propriedade de ligante, a resina serve também como protetora das fibras em relação ao meio ambiente e ainda para transmitir as cargas entre os vários filamentos de vidro.

Após a impregnação do tecido e a cura da resina fica formado o material compósito, que segundo o fabricante apresenta, entre outras, as seguintes vantagens:

- Bom comportamento a baixas e altas temperaturas
- Tempo de trabalhabilidade elevado
- Cura a temperatura ambiente
- Elevada extensão

As principais propriedades deste compósito são apresentadas na Tabela 4.6 assim como, segundo o fabricante, os valores a serem utilizados em projeto. Estes valores foram obtidos de acordo com o ACI 440 [2] e podem sofrer ligeiras alterações consoante o método de aplicação dos materiais e a legislação utilizada no seu dimensionamento.

Tabela 4.6: Propriedades do compósito utilizado [32]

<b>Propriedade</b>	<b>Norma utilizada na caracterização</b>	<b>Valor obtido nos testes</b>	<b>Valor a utilizar em Projeto</b>
Espessura do laminado	----	1,3 mm	1,3 mm
Tensão de rotura na direção principal das fibras	ASTM D-3039 [5]	575 MPa	460 MPa
Extensão na rotura		2,2%	1,76%
Módulo de Elasticidade		26,1 GPa	20,9 GPa
Tensão de rotura na direção perpendicular à direção principal das fibras		43 MPa	34,4 MPa

### ***Cristalização da resina epoxídica***

A resina (componente A) utilizada aquando da colagem das pastilhas foi encontrada na forma de um material sólido, idêntico a um cristal com alguma viscosidade superficial (Figura 4.6). Este aspeto resulta da *cristalização* e ocorre de forma frequente em resinas epoxídicas, devendo ser visto como um inconveniente e não como um problema. Resumidamente esta alteração pode ser descrita como uma mudança do estado físico do material, neste caso do líquido para o sólido, e que pode ser revertido de forma a poder utilizar-se sem problemas. Tal como acontece com a água nos ciclos de gelo-degelo em que não existe alteração das suas propriedades também a resina epoxídica quando sujeita a estas mudanças de estado não sofre alterações [39].



Figura 4.6. Resina Epóxi cristalizada.

Existem vários fatores que podem levar à cristalização da resina, o armazenamento em locais de elevada humidade, de baixa temperatura ou onde existam ciclos de temperatura próximos dos 20-30°C são alguns dos fatores mais comuns à ocorrência deste fenómeno.

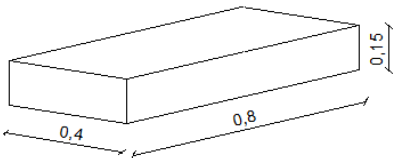
Segundo o boletim técnico da *Epotek* [39], para se voltar a utilizar a resina sem qualquer problema deve-se retirar do recipiente a quantidade necessária à execução dos trabalhos e aquecer a temperatura próxima dos 50°C durante uma ou duas horas (nunca acima dos 70°C).

## 4.3 - Caracterização da atividade experimental

### 4.3.1 - Betonagem das lajetas

Utilizou-se em cada uma das lajetas um betão em que se distinguia a dimensão dos agregados grossos. A designação dada a cada uma das lajetas assim como a sua geometria e a dimensão de brita utilizado em cada uma é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 4.7: Descrição das lajetas betonadas.

Designação	Geometria	Dimensão da brita utilizada	Classe de resistência de betão obtida
LG	 [m]	> # 1/2" (12,7 mm)	C16/20
LM		# 1/2" (12,7 mm) > Brita > # 3/8" (9,5 mm)	
LP		# 3/8" (9,5 mm) > Brita > # 4" (4,8 mm)	

Além das três lajetas foram também betonados 3 cubos para cada um dos betões; de forma a realizar ensaios de compressão todos os moldes foram lubrificados com óleo descofrante antes de receberem o betão.





Figura 4.7: Moldes das lajetas e dos cubos após serem lubrificados.

Para a preparação do betão pesaram-se inicialmente todos os materiais necessários, de forma a tornar o processo mais organizado e eficaz, de seguida foram colocados lentamente na betoneira para que a mistura fosse feita de forma correta. Inicialmente colocou-se os agregados, de seguida o cimento e por fim a água.



Figura 4.8: Materiais constituintes do betão (à esquerda). Betoneira a misturar os materiais (à direita).

Após o betão estar bem amassado foi colocado no molde da lajeta e vibrado com apoio de um vibrador elétrico para que se conseguisse um betão bem compactado (Figura 4.9). O mesmo processo repetiu-se para as restantes lajetas e para os cubos.



Figura 4.9: Vibração do betão

#### **4.3.2 - Tratamento da superfície com jacto de areia e rebarbadora**

Após a análise bibliográfica realizada e tendo em conta os condicionalismos existentes a nível laboratorial optou-se por realizar em cada uma das lajetas dois tipos de tratamento diferentes: com jacto de areia e com rebarbadora com disco de desgaste. Estes dois métodos são ainda dos métodos mais utilizados na construção, quer pela facilidade em execução quer pelo elevado rendimento obtido. Por isso existiu ainda a intenção de obter uma conclusão em relação a qual dos métodos melhor resultados apresentaria na ligação do compósito ao betão.

Para o tratamento com jacto de areia foi utilizado um aparelho próprio para o efeito, aparelho que trabalha com uma pressão de aproximadamente 1500 MPa.

O tratamento com rebarbadora foi conseguido com um disco de desgaste diamantado (Figura 4.10).



Figura 4.10: Equipamento de jacto de areia (direita) e rebarbadora (esquerda).

Segundo Galecki et al [33], o betão é um material frágil e os agregados são mais fortes que a matriz, ou seja a parte do cimento/areia que une os agregados. Tentou-se então fazer um tratamento até que os agregados ficassem expostos e se pudesse analisar a importância desta ligação ao FRP. Naturalmente o tipo de agregado que surgiu após os tratamentos tinha dimensões diferentes devido à composição que se tinha dado a cada betão, tal como foi referido anteriormente. As diferenças entre a superfície de betão, nomeadamente no que diz respeito à exposição do agregado, antes e após o tratamento, são facilmente observadas na Figura 4.11.

Na metade de cada lajeta já tratada com o jacto de areia (Figura 4.11) verifica-se a exposição do agregado grosso, a lajeta LG, mais à esquerda, apresenta um agregado claramente superior à lajeta do centro, lajeta LM, enquanto que esta têm também um agregado superior à lajeta LP situada mais à direita.



Figura 4.11: Pormenor da superfície do betão antes (esquerda) e após o tratamento com jacto de areia (direita).

As diferenças entre a exposição do agregado com o tratamento com jacto de areia e com a rebarbadora também são facilmente observadas na Figura 4.12.



Figura 4.12: Diferente exposição do agregado com rebarbadora (esquerda) e com o jacto de areia (direita).

Note-se que também as rugosidades obtidas com os dois tratamentos são diferentes. Este aspeto será tratado no capítulo seguinte.

Após o tratamento de superfície a superfície foi bem limpa, utilizou-se uma escova de aço para eliminarem-se pequenas partículas soltas e com um jacto de ar removeu-se todo o pó e impurezas.

#### **4.3.3 - Análise da rugosidade da superfície**

Para analisar a rugosidade de uma superfície existem no mercado vários métodos, por razões de logística foi utilizado o Método Volumétrico da Mancha de Areia, elaborado segundo a norma EN 13036-1 [26] e com o apoio de Specht [57].

Este método pode resumir-se ao seguinte procedimento:

- Medição volumétrica,  $V$ , de uma areia calibrada, (4 ml);
- Espalhamento da areia sobre a superfície, distribuindo-a com um elemento de borracha de forma a formar aproximadamente uma mancha circular;
- Medição do diâmetro formado pela mancha criada. Este diâmetro deve ser medido no mínimo 4 vezes, uma vez que a mancha muito dificilmente será um círculo perfeito. Após as 4 medições calcula-se o diâmetro médio,  $d_{\text{méd}}$ ;
- Cálculo da altura de areia,  $h_s$ , recorrendo à expressão 4.6.



$$h_s = \frac{\text{Volume de areia}}{\text{Área da mancha}} \quad 4.6$$



Figura 4.13: Equipamento para Ensaio da Mancha de Areia

Segundo a DER-MG [22] a altura,  $h_s$ , encontrada pode ser associada ao conceito de rugosidade a partir da Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Caracterização da Rugosidade segundo a DER-MG [22].

Altura de areia, $h_s$	Rugosidade
$h_s < 0,2 \text{ mm}$	Muito fina
$0,2 \text{ mm} < h_s < 0,4 \text{ mm}$	Fina
$0,4 \text{ mm} < h_s < 0,8 \text{ mm}$	Média
$0,8 \text{ mm} < h_s < 1,2 \text{ mm}$	Grossa
$h_s > 1,2 \text{ mm}$	Muito Grossa

#### **4.3.4 - Colagem do compósito de fibras de vidro**

A aplicação do GFRP foi precedida de um estudo de algumas das características dos materiais, nomeadamente o *open time* (2 h) da resina, o seu *pot life* (30 minutos), a forma de misturar os dois componentes, a quantidade a misturar de cada componente e ainda o processo que se deveria adotar para que a ligação ao betão fosse o melhor possível. Quanto às fibras foram cortadas com uma tesoura com cuidado para não se danificar ou desfiar os tecidos. Em uma das lajetas foram aplicadas duas camadas de tecido, foram por isso cortados 6 retângulos de tecido com 800mm×400mm (Figura 4.14) de forma a ocupar toda a superfície das lajetas.



Figura 4.14: Lajeta e tecido de fibra de vidro antes da colagem.

Após o corte das fibras foi feita a colagem destas nas lajetas, este processo pode-se resumir a:

- Preparação da resina epoxídica, misturando os dois componentes num recipiente de aproximadamente 20 litros com o apoio de um misturador elétrico;
- Aplicação de uma pequena camada de resina sobre a superfície da lajeta para que os vazios do betão fossem bem preenchidos e a ligação da fibra fosse a melhor possível;
- O tecido foi “mergulhado” no recipiente com a resina, e com o apoio de luvas de borracha garantiu-se que o tecido ficava todo impregnado com resina, mas sempre com o cuidado de remover todos os excessos da mesma; estes excessos eram retirados passando as mãos pelo tecido, sempre na direção longitudinal das fibras para não danificar o alinhamento das mesmas (Figura 4.15);



Figura 4.15: Impregnação e remoção dos excessos de resina num tecido de fibra de vidro.

- Colagem da primeira camada de tecido em cada lajeta, sempre com o cuidado de alinhar o tecido com a lajeta, garantindo o preenchimento de todos os vazios e remoção das bolsas de ar acomodadas entre o betão e as fibras, (Figura 4.16). A direção longitudinal das fibras ficou alinhada com a maior direção da laje.



Figura 4.16: Colagem das fibras. Remoção de todos os vazios e bolsas de ar.

- Aplicação da segunda camada de fibra e remoção dos excessos de resina. Também nesta camada se teve o cuidado de eliminar as bolsas de ar acumuladas, Figura 4.17.



Figura 4.17: Colagem da segunda camada de fibra na lajeta LM.

- Após a colagem da segunda camada de fibra, a cura foi feita a temperatura ambiente durante aproximadamente 30 dias.



Figura 4.18: Aspeto final das fibras coladas na lajeta

#### **4.3.5 - Envelhecimento acelerado com ciclos de marés**

O envelhecimento realizado visa simular a ação das marés, ou seja, ciclos de imersão-emersão, sendo a solução utilizada de caráter salino, ou seja, água com uma taxa de concentração de NaCl de 50g/l, taxa ligeiramente superior à encontrada nas águas que banham as costas Portuguesas. O NaCl utilizado para efetuar a solução salina foi fornecido em sacos de 25 kg de material granular HYDROSOFT®, como se apresenta na Figura 4.19.





Figura 4.19: Sal utilizado

Para realizar este tipo de envelhecimento utilizaram-se dois tanques cilíndricos, (tanque A e tanque B) com capacidade para aproximadamente 1,3 m<sup>3</sup> cada (Figura 4.20).

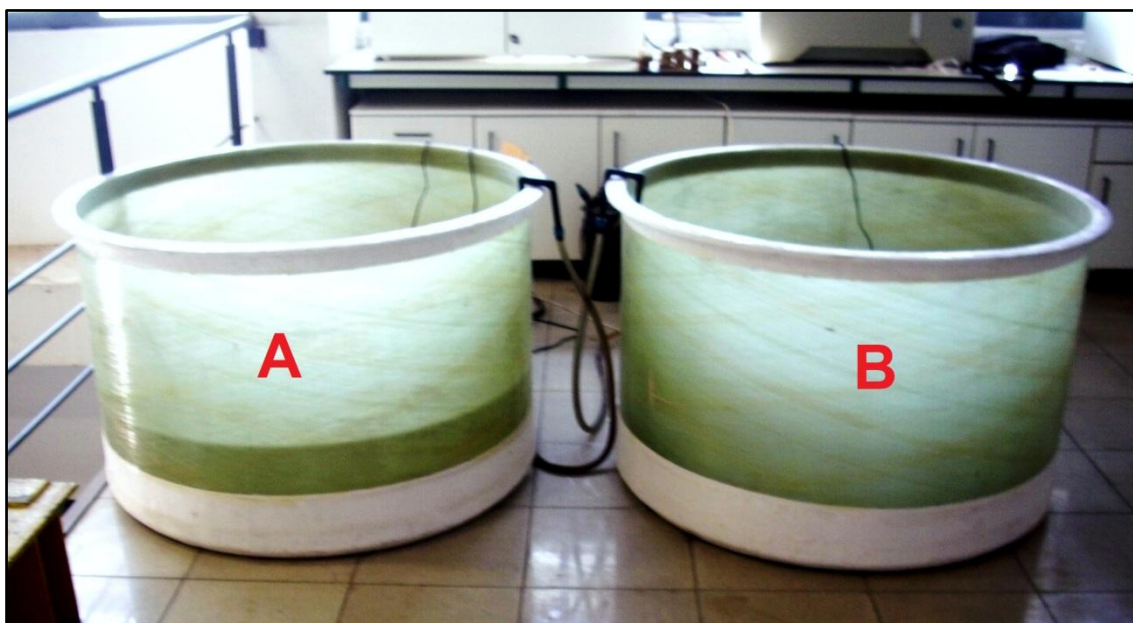


Figura 4.20: Tanques utilizados no envelhecimento acelerado.

As lajetas foram colocadas no tanque B (Figura 4.20 e Figura 4.21) enquanto a solução foi preparada no tanque A. Inicialmente foram preparados 400 litros de solução, a quantidade suficiente para emergir as lajetas dentro dos tanques; com o passar do tempo a água ia evaporando e a percentagem de sal aumentando; por isso, sempre que as lajetas eram imersas, essa percentagem era regularizada através da adição de mais água. Com o objetivo de tentar acelerar os efeitos da água e dos sais nos provetes de ensaio a água foi aquecida a

aproximadamente 30°C e mantida a esta temperatura sempre que as lajetas estavam imersas. Para este efeito foram utilizadas 3 resistências elétricas com um total de 700 Watts. A percentagem de sal contida na água, assim como a sua temperatura foram medidas com o apoio de um condutivímetro.



Figura 4.21: Disposição das lajetas no tanque B

O ciclo escolhido para imersão-emersão consistia em um dia com as lajetas completamente imersas na solução apresentada anteriormente e depois seis dias a secarem em ambiente laboratorial. Ou seja, a água ficaria 1 dia no tanque B, e depois a água seria passada para o tanque A e ficaria aí seis dias.

Para a passagem da água de um tanque para o outro foram utilizadas bombas elétricas.

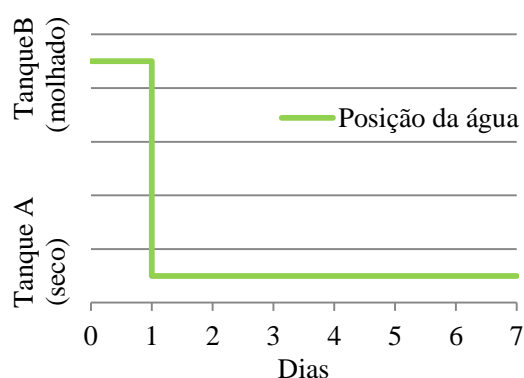


Figura 4.22: Ciclos de ensaio (seco-molhado).

Este envelhecimento teve início no dia 10 de maio de 2012 e prolongou-se durante 2000 horas, completando um total de doze ciclos. Durante os doze ciclos realizados foram registados todos os valores das condições a que as lajetas eram mantidas (Figura 4.23), a percentagem de sal, temperatura laboratorial e temperatura da água quando as lajetas estavam imersas. Note-se que a percentagem de sal todas as semanas era regularizada, uma vez que alguma água evaporava durante a semana. Esta evaporação fazia a quantidade de água diminuir mas não a quantidade de sal, logo havia a necessidade de em cada ciclo elaborado fazer a regularização com um acréscimo de água nos tanques. Às mil horas foram realizados 18 arrancamentos Diretos e no total das 2000 horas mais 18 arrancamentos. Desta maneira poder-se-á concluir sobre a evolução do comportamento da ligação, e não apenas concluir sobre o resultado final.

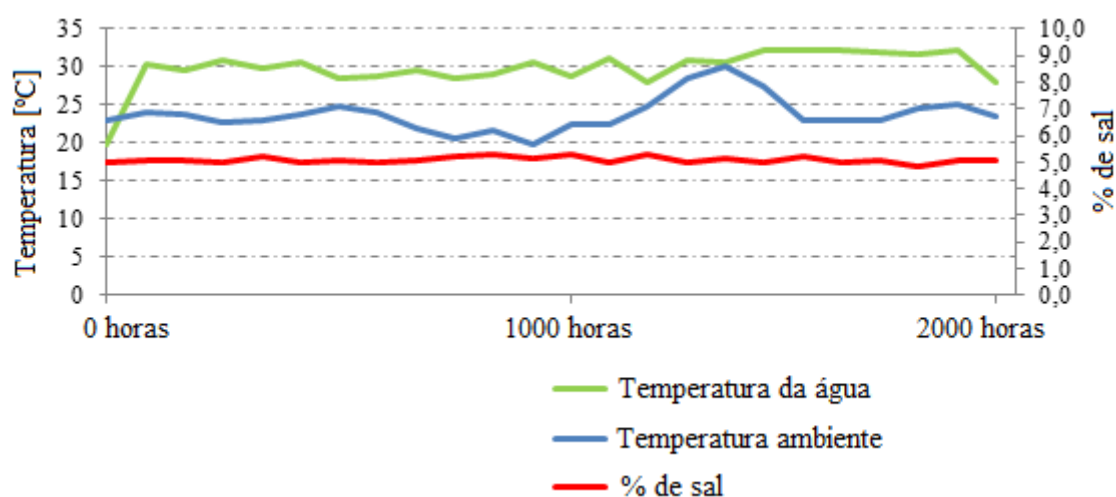


Figura 4.23: Condições durante o envelhecimento

#### 4.3.6 - Ensaios de aderência

O ensaio de aderência, ou ensaio de arrancamento direto, descrito anteriormente foi realizado com um dinamómetro com 13,3 MPa de capacidade. Este aparelho é um dispositivo manual em que tem de ser o operador a introduzir a força de arrancamento através da rotação de uma manivela.

Este ensaio seguiu o seguinte procedimento:

- Marcação nas fibras de todos os pontos onde seriam realizadas as carotes. Inicialmente, antes do envelhecimento, realizaram-se 18 arrancamentos por lajeta, 9 por cada

tratamento de superfície, sendo esses 9 divididos em 3 séries de 3 que variavam entre si a profundidade do carote. Tal como se pode ver na Figura 4.24, optou-se por profundidades de carote de 0 mm, 10 mm e 20 mm.

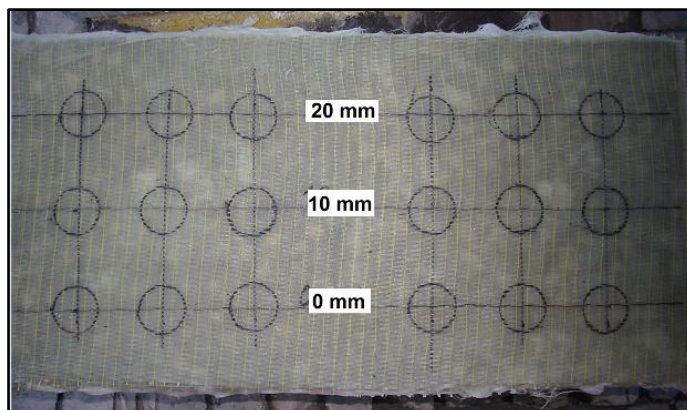


Figura 4.24: Mapa dos arrancamentos

As profundidades referidas são medidas a partir da superfície do betão (Figura 4.25). Ou seja, quando se indica uma profundidade de zero milímetros apenas se corta o compósito e a resina epoxídica, a broca não chega a perfurar o betão.

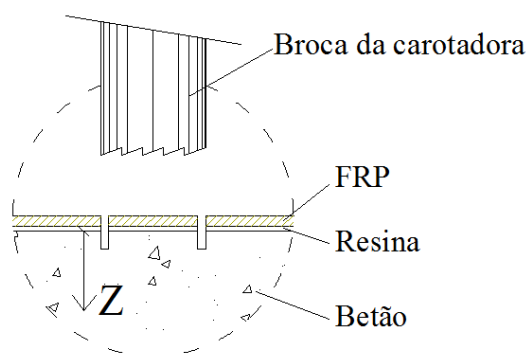


Figura 4.25: Esquema representativo da profundidade (Z) dos carotes.

- Elaboração das carotes. Para tal utilizou-se uma carotadora com uma broca de  $\Phi_{int}=50\text{mm}$  (diâmetro interno). A broca utilizada para atravessar a camada de GFRP e o betão foi a mesma, uma vez que se verificou que conferia um corte certo, ou seja um corte sem danificar o material envolvente (ver Figura 4.26).





Figura 4.26: Caroteadora (esquerda). Realização de um carote na lajeta (direita).



Figura 4.27: Carote e pastilha De arrancamento direto.

- Após efetuado todo o caroteamento foram coladas as pastilhas. Por questões de logística foram coladas 18 de cada vez, uma lajeta de cada vez. Este processo foi feito com a mesma resina que se utilizou para aplicar o GFRP ou seja, a Tyfo<sup>®</sup> S Epoxy [32].
- O ensaio foi realizado após mais de 72 horas de cura da resina.
- Após o arrancamento as pastilhas foram limpas, foi retirado o carote e todos os resíduos da resina utilizada, para que se pudessem colar na lajeta seguinte sem qualquer impureza restante do ensaio anterior. Para facilitar esta operação as pastilhas foram colocadas durante duas horas numa estufa a aproximadamente 150°C, diminuindo assim as capacidades da resina e permitindo a esta descolar da pastilha utilizando apenas uma espátula.
- Após realizados os arrancamentos nas três lajetas, os dados foram tratados e analisados. Tendo-se feito esta análise avançou-se para os envelhecimentos com ciclos de marés.

- Às 1000 horas e às 2000 horas repetiram-se os ensaios. Em cada um destes casos foram realizados 6 carotes por lajeta, 3 por cada tratamento de superfície. Com o objetivo de tentar solicitar principalmente a zona de ligação FRP-betão e estudar o efeito do envelhecimento nesta ligação, todos os carotes foram realizados com 0 mm, ou seja, apenas se “rasgou” a fibra.

## **4.4 - Resultados experimentais**

### **4.4.1 - Descrição geral**

No presente ponto será apresentada a síntese dos resultados experimentais obtidos ao longo do trabalho laboratorial. Dar-se-á importância às diferenças obtidas com os diferentes tratamentos de superfície realizados, à influência que a dimensão do agregado tem na ligação betão-FRP e ainda ao efeito do envelhecimento das juntas no sistema de reforço estudado.

Uma das principais diferenças nas superfícies tratadas pelos diferentes métodos é a rugosidade, como já se referiu no capítulo anterior. Fizeram-se medições de rugosidade com recurso ao método da mancha de areia; esses resultados serão também aqui expostos. A rugosidade será ainda relacionada com os valores da tensão de arrancamento obtidos para tentar encontrar aquela que melhores resultados oferece e por consequência o tratamento mais adequado a fazer.

Os resultados sem envelhecimento, ou seja, às zero horas, e visto que se realizaram carotes com diferentes profundidades, são apresentados sobre a forma de gráficos carga-profundidade do carote.

Os resultados obtidos às 1000 horas e às 2000 horas de envelhecimento serão apresentados sob a forma de gráficos de dispersão, onde se poderá observar a diferença dos valores obtidos para cada betão e cada tratamento de superfície.

### **4.4.2 - Rugosidade da superfície**

Na Figura 4.28 podem observar-se as várias manchas de areia criadas para medir a rugosidade das lajetas, as diferenças entre a rugosidade criada pelo jacto de areia e pela rebarbadora são

facilmente observadas na figura, note-se que uma rugosidade menor implica manchas de areia maiores.

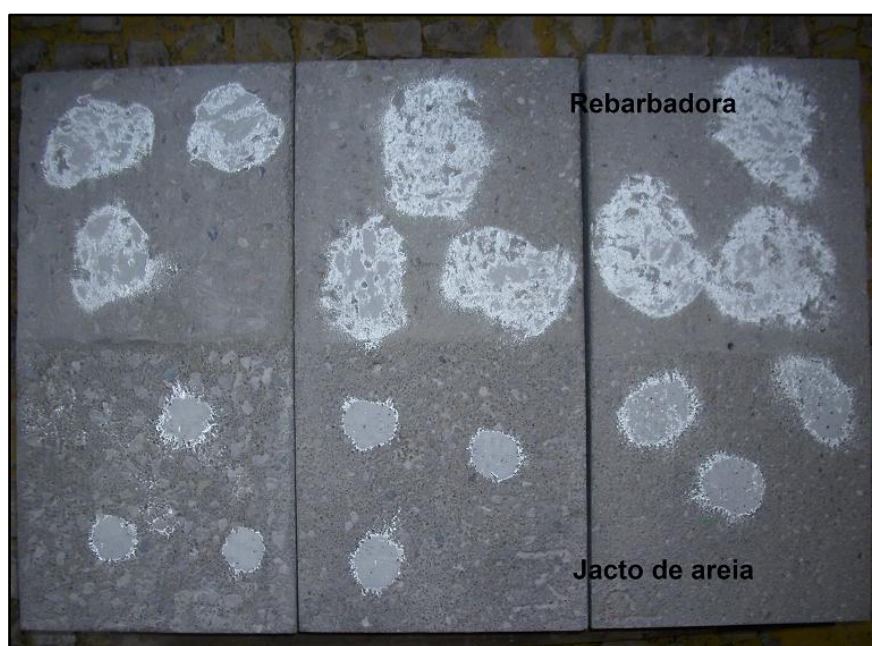


Figura 4.28: Método Volumétrico da Mancha de Areia, diferença entre Jacto de areia e Rebarbadora

Na Figura 4.29 são apresentados os resultados obtidos pelo ensaio da Mancha de Areia. São apresentados os resultados para as várias lajetas e para os dois tratamentos de superfície realizados. Faz-se também a ligação entre o valor obtido em altura de areia e o tipo de rugosidade segundo o DER-MG [22].

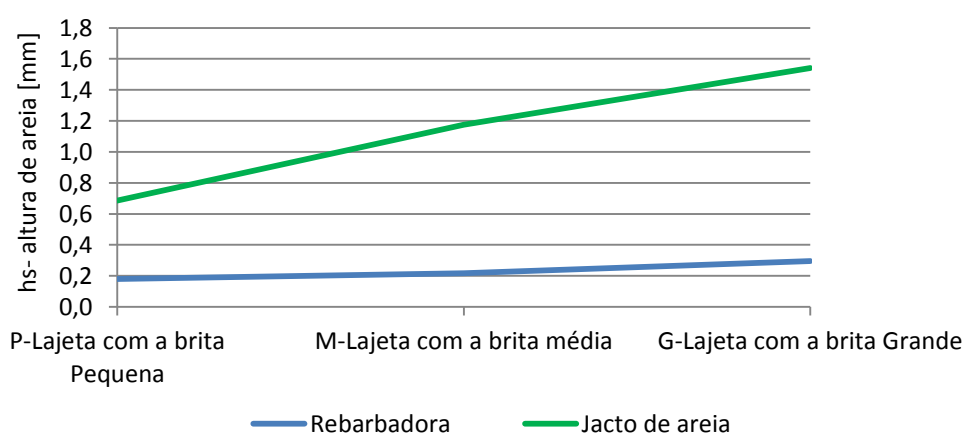


Figura 4.29: Altura de areia ( $h_s$ ) obtida para as diferentes superfícies, utilizando o Ensaio Mancha de Areia, com classificação segundo DER-MG [22].

#### **4.4.3 - Ensaio De arrancamento direto**

Os gráficos e resultados apresentados nesta secção são referentes a ensaios de arrancamento direto realizados em lajetas em betão reforçadas com duas camadas de tecido de fibra de vidro e que foram envelhecidos com ciclo de marés, ambiente já caracterizado anteriormente.

Serão analisadas as evoluções na tensão de arrancamento e no modo de rotura entre:

- As diferentes lajetas, uma vez que o betão é constituído por diferentes agregados;
- Os diferentes tratamentos de superfície;
- As diferentes profundidades a que se pode realizar o carote;
- As diferentes fases do envelhecimento acelerado.

##### **4.4.3.1 - Ensaio sem envelhecimento**

- **Lajeta com brita pequena (LP)**

Na Tabela 4.9 e na Figura 4.30 observam-se os resultados dos ensaios de arrancamento direto realizados na lajeta LP, sem qualquer envelhecimento, e com diferentes profundidades dos carotes. Os valores apresentados graficamente correspondem à média, mínimo e máximo obtidos em cada tipo de tratamento de superfície e para cada profundidade de carote.

Tabela 4.9 - Valores da tensão de arrancamento direto às 0 horas na lajeta com brita pequena (LP)

<b>Tratamento de superfície</b>	<b>Profundidade do carote</b>	<b>0 mm</b>	<b>10 mm</b>	<b>20 mm</b>
Jacto de areia	Média	2,48	2,46	1,77
	Mínimo	2,05	2,02	1,45
	Máximo	2,75	2,90	2,06
Rebarbadora	Média	3,23	2,53	1,53
	Mínimo	2,52	2,37	1,10
	Máximo	3,89	2,82	1,88



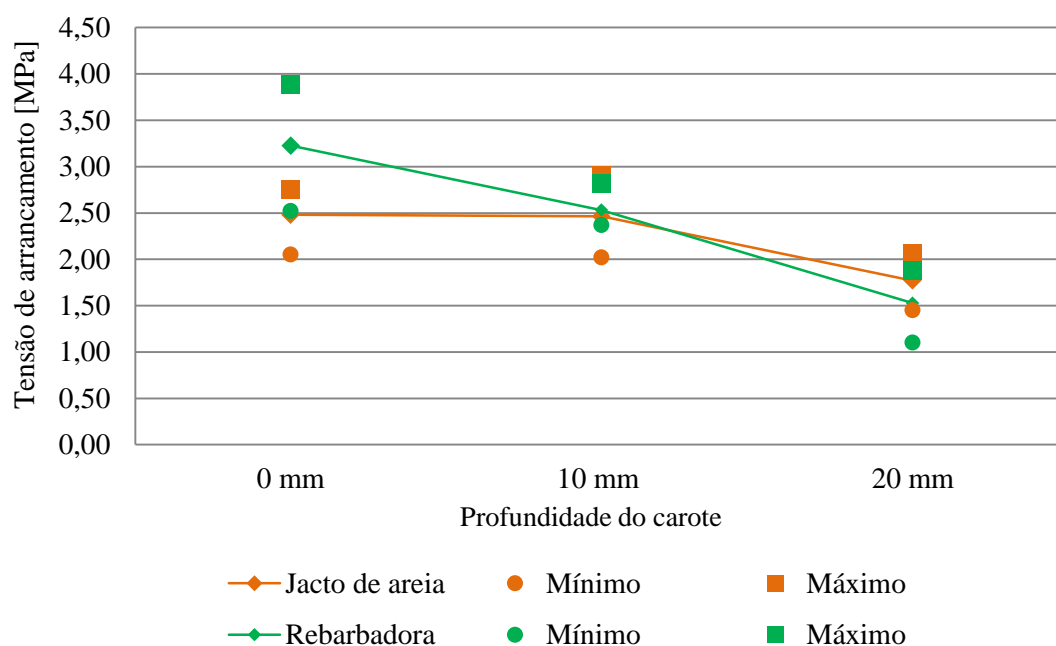


Figura 4.30: Evolução da tensão de arrancamento direto com a profundidade do carote na lajeta com brita pequena (LP)

Note-se que o valor da tensão de arrancamento direto tende a diminuir com a profundidade do carote. Uma vez que o betão tracionado é o do carote com uma secção circular de 50 mm de diâmetro este valor deveria manter-se constante, já que a secção do carote se mantém constante com a profundidade. Se a secção se mantém constante, tem de haver alteração na capacidade resistente à tração dos materiais. Esta justificação pode estar no facto da broca, ao ter de cortar o betão através da rotação em torno do carote, podendo penalizar o betão. Logo, quanto mais profundo for o carote mais penalização a broca pode induzir no betão e por isso as tensões de arrancamento deverão diminuir com a profundidade do carote.

- **Lajeta com brita média (LM)**

A Figura 4.31 ilustra os resultados dos ensaios de arrancamento direto obtidos na lajeta LM, sem qualquer envelhecimento, e com diferentes profundidades dos carotes. São igualmente apresentados valores médios, mínimos e máximos em cada caso. Também neste caso a tensão tende a diminuir com a profundidade do carote.

Tabela 4.10 - Valores da tensão de arrancamento direto às 0 horas na lajeta com brita média (LM)

Tratamento de superfície	Profundidade do carote	0 mm	10 mm	20 mm
Jacto de areia	Média	2,03	2,01	1,64
	Mínimo	1,64	1,69	1,61
	Máximo	2,32	2,21	1,67
Rebarbadora	Média	2,14	1,94	1,71
	Mínimo	1,82	1,70	1,42
	Máximo	2,54	2,09	2,05

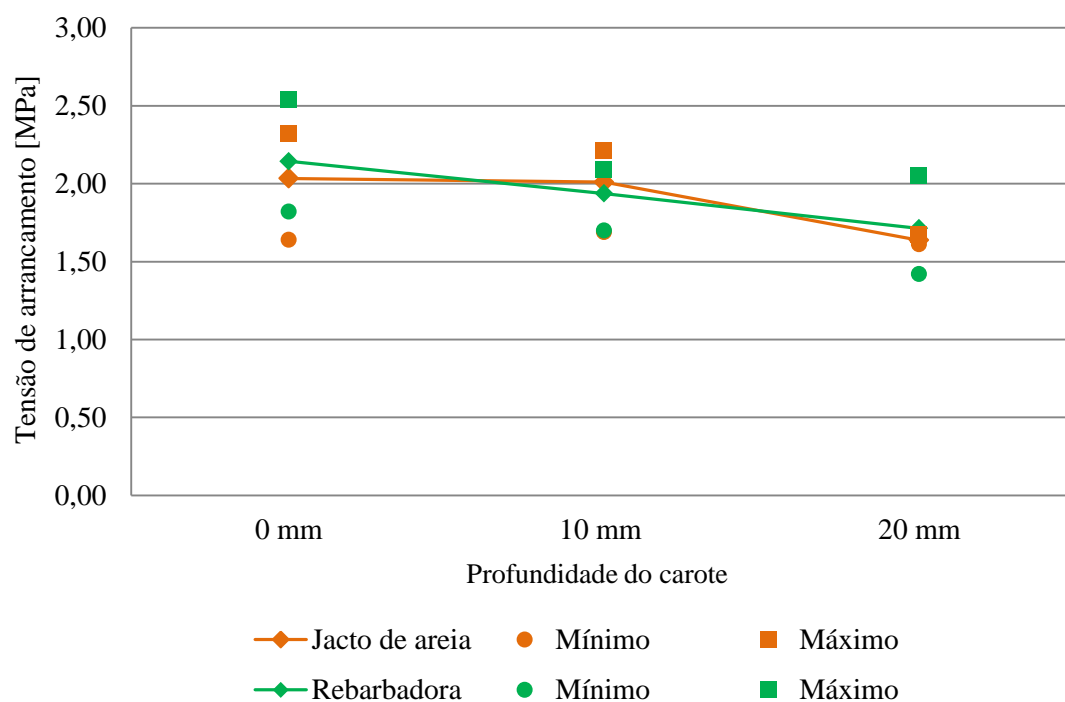


Figura 4.31: Evolução da tensão de arrancamento direto com a profundidade do carote na lajeta com agregado médio (LM)

#### • Lajeta com brita grande (LG)

Os resultados médios, mínimos e máximos obtidos para a lajeta LG, também referentes às zero horas e para os dois tratamentos de superfície adotados são apresentados na Figura 4.32.

Tabela 4.11 - Valores da tensão de arrancamento direto às 0 horas na lajeta com brita grande (LG)

Tratamento de superfície	Profundidade do carote	0 mm	10 mm	20 mm
Jacto de areia	Média	2,96	2,52	1,54
	Mínimo	1,98	2,19	1,30
	Máximo	3,83	3,01	1,69
Rebarbadora	Média	2,62	2,52	2,17
	Mínimo	2,51	2,29	1,93
	Máximo	2,81	2,67	2,64

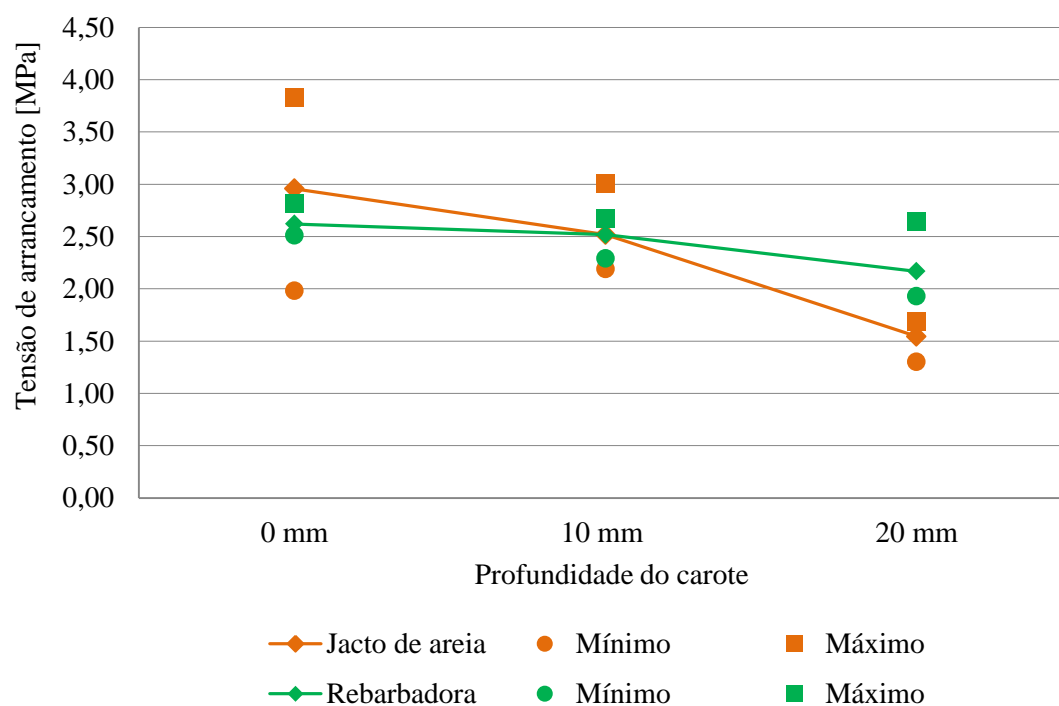


Figura 4.32 - Evolução da tensão de arrancamento direto com a profundidade do carote na lajeta com agregado grande (LG)

Mais uma vez se verifica a diminuição da tensão de arrancamento direto com a profundidade do carote.

#### **4.4.3.2 - Ensaio às 1000 horas - Envelhecimento com ciclos seco-molhado**

Os resultados obtidos às 1000 horas de envelhecimento podem ser observados na Tabela 4.12. Neste caso, uma vez que se pretende analisar principalmente a influência do envelhecimento na zona de ligação Betão-FRP, na realização dos carotes apenas se cortou a material compósito, não se cortou o betão, pensando-se desta forma solicitar principalmente a zona em estudo.

Tabela 4.12: Resultados obtidos pelo ensaio de arrancamento direto às 1000 horas

Tratamento de Superfície	Tensão de arrancamento direto [MPa]		
	Lajeta LP	Lajeta LM	Lajeta LG
Jacto de Areia	2,16	1,81	2,62
	2,11	1,61	2,36
	1,53	1,9	2,15
Rebarbadora	0,99	1,98	1,86
	1,97	2,07	1,9
	2,01	1,83	2,19

Estes resultados são apresentados também na Figura 4.33, sob a forma de gráfico de dispersão. Desta maneira, podem-se comparar mais facilmente os resultados obtidos para os diferentes tratamentos de superfície e diferentes lajetas.

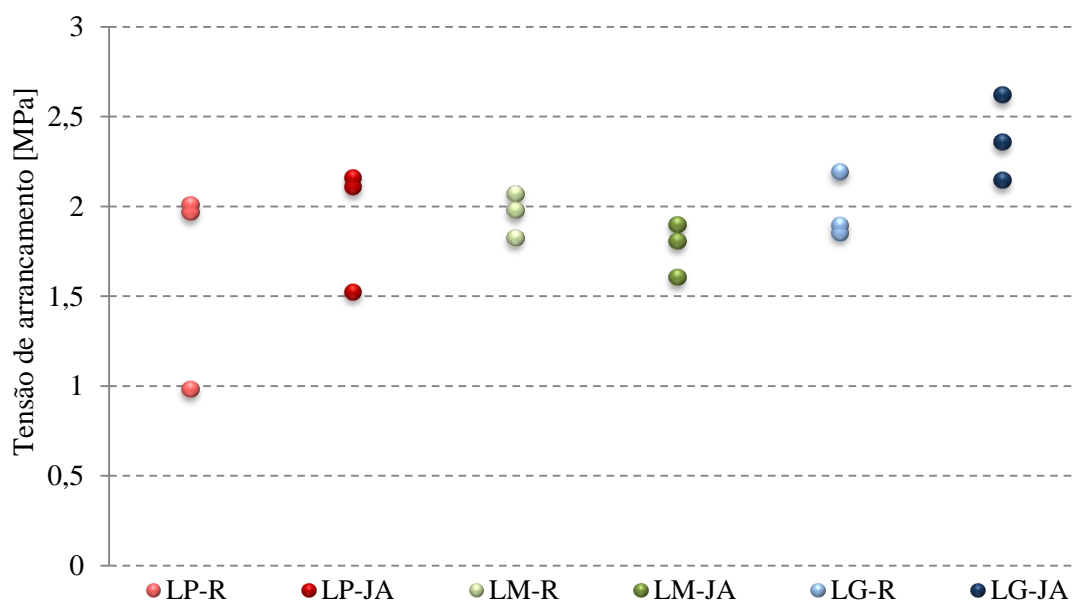


Figura 4.33: Resultados de arrancamento direto obtidos após 1000 horas de envelhecimento nas várias lajetas e para os dois tratamentos de superfície executados

#### 4.4.3.3 - Ensaios às 2000 horas - Envelhecimento com ciclos seco-molhado

Tal como às 1000 horas na Tabela 4.13 e no gráfico apresentado na Figura 4.34 podem ser observados os valores obtidos para os ensaios De arrancamento direto, ensaios realizados às 2000 horas e com os carotes a zero milímetros, ou seja, apenas a cortar a fibra.

Tabela 4.13: Resultados obtidos pelo ensaio de arrancamento direto às 2000 horas

Tratamento de Superfície	Tensão de arrancamento [MPa]		
	Lajeta LP	Lajeta LM	Lajeta LG
Jacto de Areia	2,41	1,77	2,57
	2,85	1,91	1,63
	2,33	1,47	2,43
Rebarbadora	2,31	1,64	2,33
	1,91	1,68	1,98
	2,94	1,46	2,19

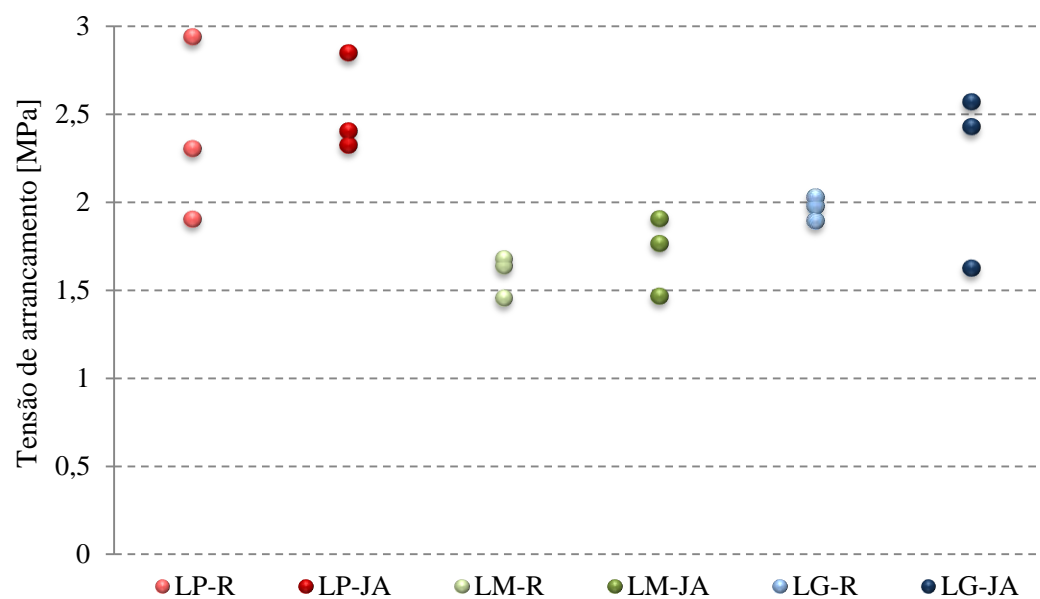


Figura 4.34: Resultados de arrancamento direto obtidos após 2000 horas de envelhecimento nas várias lajetas e para os dois tratamentos de superfície executados

## **Capítulo 5 - Interpretação de resultados**

### **5.1 - Introdução**

O presente capítulo tem por finalidade a análise e discussão dos valores apresentados anteriormente. O efeito dos envelhecimentos do tratamento de superfície e do tipo de betão utilizado serão comparados a partir dos valores de arrancamento direto obtidos.

### **5.2 - Ensaaios de compressão**

Uma das preocupações iniciais na execução do trabalho experimental, visto pretender-se utilizar diferentes dimensões de brita nos provetes, foi conseguir betões com igual capacidade resistente à compressão para que esta não fosse mais uma variável no trabalho e assim fosse mais fácil comparar resultados e retirar conclusões. Realizados os ensaios, verificou-se que a diferença do valor medio da tensão de rotura do betão à compressão entre os três betões diferentes é inferior a 1 MPa, e que não existe uma relação linear entre os três valores.

## **5.3 - Rugosidade**

Os resultados obtidos em cada uma das lajetas foram distintos para os dois métodos utilizados, sendo o jacto de areia aquele que provoca rugosidade superior. Através da análise com o método da mancha de areia, no caso da lajeta com agregados pequenos tratada com o jacto de areia obteve-se uma altura de areia de 0,68 mm, enquanto que com a rebarbadora obteve-se 0,18 mm, ou seja, 26,47%. No caso da lajeta com agregados grandes, tratamento com jacto de areia, obteve-se uma altura de areia de 1,54 mm com a rebarbadora apenas 0,30 mm, aproximadamente 19,5%. Os valores demonstram a diferença obtida pelos dois métodos, evidenciando a superior rugosidade criada pelo jacto de areia, e também o facto de, no betão com a brita maior, a diferença criada entre os dois métodos ser mais relevante que no betão com a brita pequena.

## **5.4 - Resultados dos ensaios de arrancamento direto**

Nesta secção serão analisados e relacionados os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento Direto às zero horas. Serão comparados os valores obtidos para as diferentes condições impostas aos provetes, nomeadamente o tratamento de superfície, o tipo de betão de cada provete e ainda a profundidade dos carotes.

Serão ainda comparados os valores obtidos após o envelhecimento com ciclo de marés às 1000 horas e às 2000 horas e ainda analisar a existência ou não de uma alteração no modo de rotura ao longo do envelhecimento.

### **5.4.1 - Ensaio sem envelhecimento**

Os ensaios realizados inicialmente podem-se dividir em vários subgrupos, podendo-se agrupar pela profundidade do carote realizado, pelo tratamento de superfície dado ao betão nessa zona e ainda pela dimensão do agregado utilizado.

Inicialmente será tratada a influência da profundidade a que é efetuado o carote.



Na Figura 5.1 verifica-se que com o aumento da profundidade do carote a tensão de arrancamento diminui em todos os betões e para os dois tratamentos de superfície diferentes.

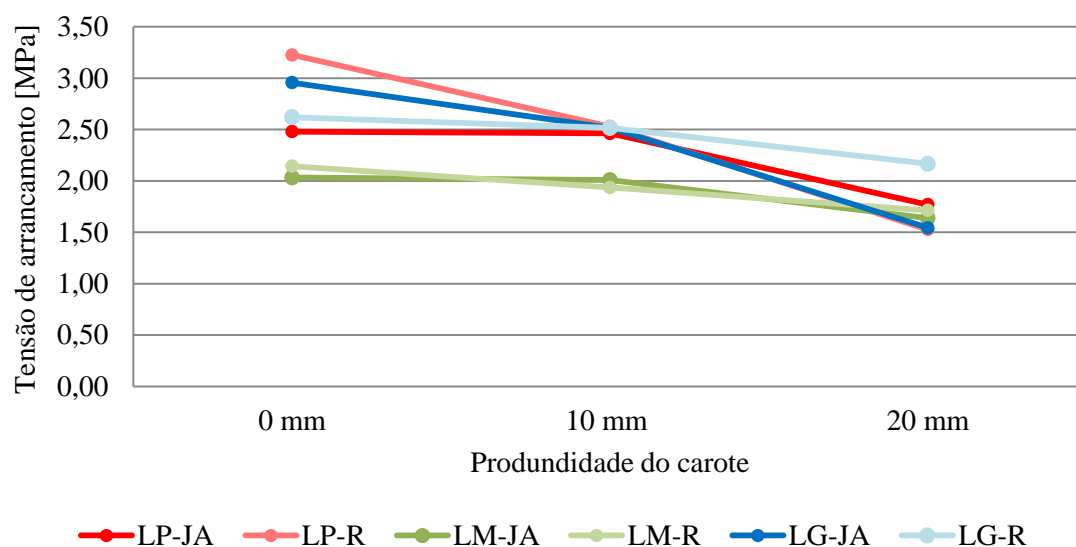


Figura 5.1: Evolução da tensão de arrancamento com a profundidade do carote.

Segundo a expressão 2.6 o valor médio da resistência à tração perpendicular à ligação betão-material obtido no ensaio de arrancamento direto ( $f_{ctm,p}$ ) para os betões utilizados neste trabalho, betões com um  $f_{cm}$  próximo de 23 MPa, será de 1,45 MPa. Na Figura 5.1 pode observar-se que os valores obtidos experimentalmente foram superiores aos fornecidos pelo método da Concrete Society [18]. No entanto tendem a aproximam-se deste valor com o aumento da profundidade do carote. É importante referir que a Concrete Society [18] apenas recomenda a utilização da 2.6 para cálculo do  $f_{ctm,p}$  no caso em que o modo de rotura é o primeiro, ou seja, pelo betão (Figura 5.2) e neste trabalho existem vários ensaios em que o modo de rotura foi o segundo, ou seja, rotura parcial por corte no betão e descolagem na interface adesivo-betão (Figura 5.3).



Figura 5.2. Modo de rotura 1- Rotura pelo betão

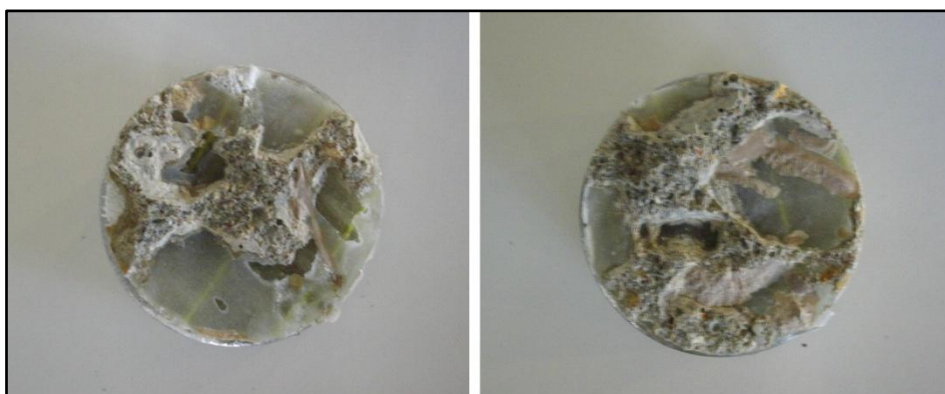


Figura 5.3: Modo de rotura 2 - Rotura parcial por corte no betão e descolagem na interface adesivo-betão.

Os resultados obtidos neste trabalho são um misto de arrancamentos pelo betão e arrancamentos por rotura parcial por corte no betão e descolagem na interface adesivo-betão, e por isso

Relativamente aos dois métodos de tratamento de superfície utilizados, sabe-se que, como visto anteriormente, o jacto de areia foi aquele que induziu maior rugosidade na superfície do betão nas três lajetas e foi ainda o método que provocou uma exposição de agregado maior.

Na Figura 5.4 verifica-se a evolução da tensão de rotura para os ensaios realizados em superfícies tratadas pelos dois métodos referidos.

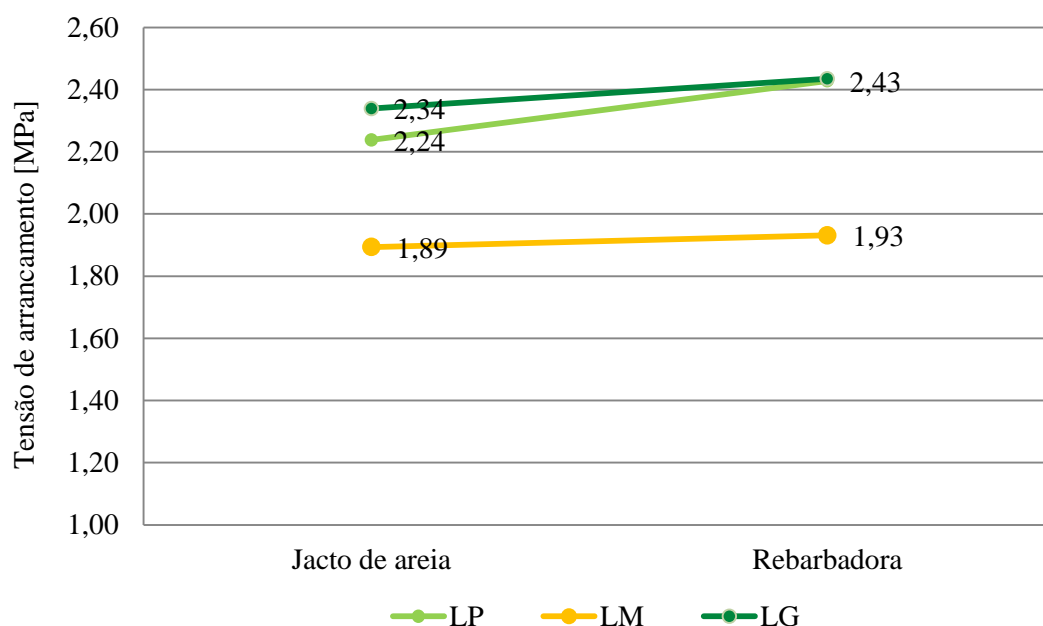


Figura 5.4: Média da tensão de arrancamento obtida para cada um dos tratamentos de superfície.

Pode-se observar que a diferença entre os valores obtidos com o jato de areia e a rebarbadora é baixa. No caso da lajeta com agregados médios a diferença é inferior a 0,05 MPa sendo a maior diferença obtida de apenas 0,21 MPa correspondente à lajeta com agregado pequeno.

Apesar da baixa diferença entre os valores verifica-se uma diminuição do valor da tensão de arrancamento com o aumento da rugosidade da superfície. Este facto poderia estar relacionado com a possível presença de vazios entre a superfície de betão e o FRP, isto uma vez que a rugosidade é mais elevada e na colagem das fibras poderiam ter ficado espaços por preencher com resina epoxídica gerando assim vazios onde não ocorreria transmissão de força. No entanto, como o modo de rotura presente maioritariamente neste trabalho foi o modo 1-arrancamento pelo betão, a diminuição da tensão de arrancamento com o aumento da rugosidade estará ligado ao facto do jacto de areia utilizado ser muito agressivo e ter penalizado o betão superficial com microfissuras e descolagem (parcial) de agregado, teoria também defendida por alguns dos autores analisados, como por exemplo Myers et al [18] e Bissonnette et al [13].

É de concluir que a rugosidade ideal a dar às superfícies do betão está compreendida entre as duas obtidas, uma vez que os dois tipos de tratamentos utilizados ofereceram rugosidades muito diferentes e o jacto de areia utilizado está já num patamar que causa dano no betão. Possivelmente a utilização de um jacto de areia com menos pressão, mais afastado da lajeta, ou então com menos tempo de utilização por metro quadrado ofereceria melhores resultados.

O facto de os agregados grossos variarem de dimensão de lajeta para lajeta foi também analisado. Como referido anteriormente verificou-se que esse parâmetro em nada afetou a capacidade resistente do betão à compressão, tendo-se obtido um  $f_{cm}$  próximo de 23 MPa para todos os betões. A rugosidade obtida em cada lajeta e ainda a exposição do agregado foi aumentando com o tamanho do agregado (Figura 4.29). Na Figura 5.5 pode-se observar que na lajeta de agregado pequeno a tensão de arrancamento é idêntica à da lajeta com agregado grande. Apenas na lajeta com agregado de tamanho médio se observa uma diminuição do valor da tensão. Não se associa então esta variação com o tamanho do agregado.

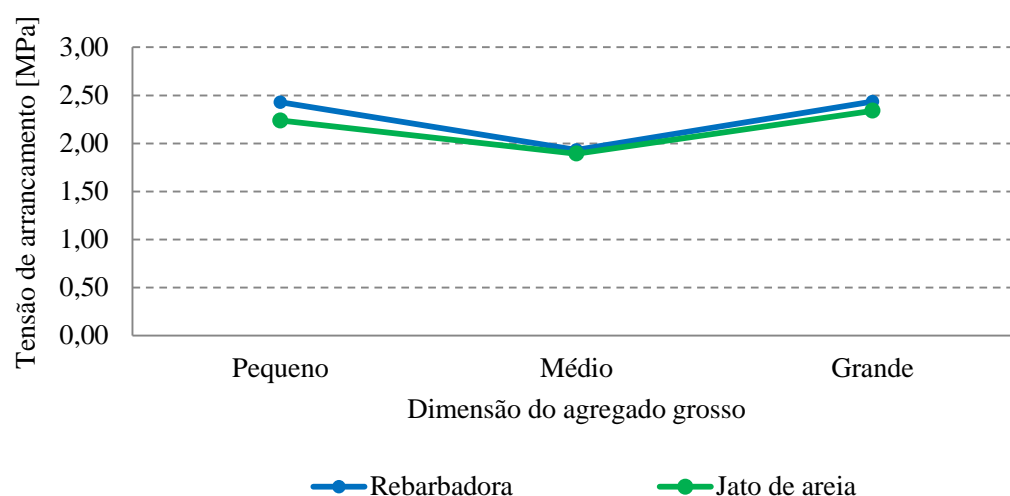


Figura 5.5: Diferença na tensão de arrancamento com a variação da dimensão da brita.

Nas Figura 5.6, Figura 5.7, e Figura 5.8 pode-se observar que com a dimensão do agregado grosso se registou uma diferença significativa no modo de rotura.

Na lajeta com brita pequena o modo de rotura teve tendência a ser o primeiro, ou seja pelo betão. Ocorreram alguns com o segundo modo, mas não se pode associar esse facto ao tratamento de superfície ou à profundidade do carote. Uma vez que o betão não é um material homogêneo, a presença de maior ou menor percentagem de agregados na zona onde foi efetuado cada carote pode ser resposta a este facto.

Na Figura 5.7 pode-se verificar que na lajeta com agregado grosso médio o modo de rotura se manteve idêntico ao registado na lajeta com agregado pequeno, ou seja, praticamente todos os ensaios romperam pelo betão.

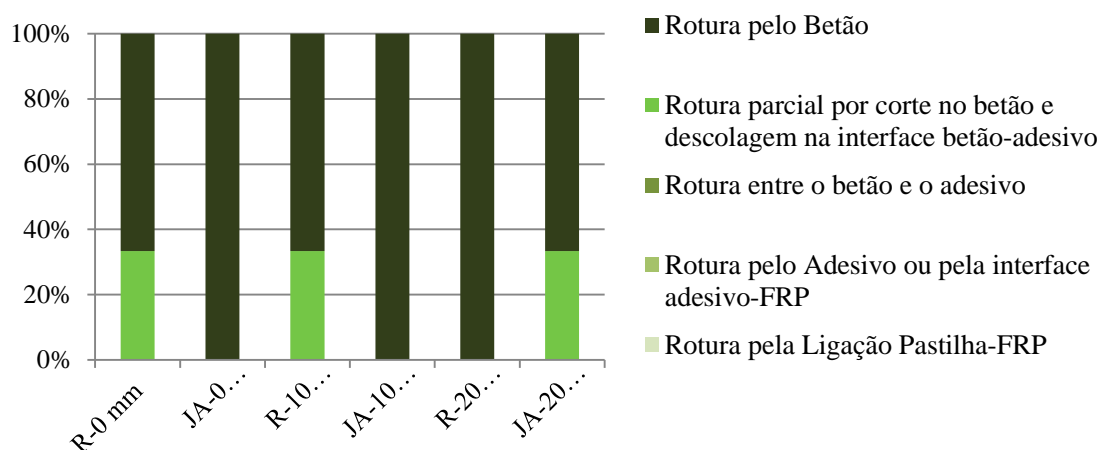


Figura 5.6: Modos de rotura ocorridos na lajeta com agregado pequeno (LP).

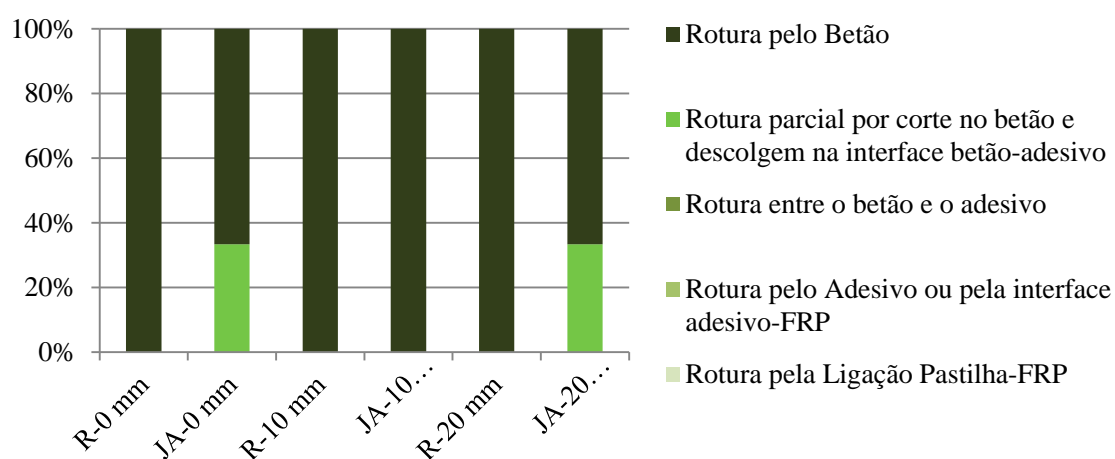


Figura 5.7: Modos de rotura ocorridos na lajeta com agregado médio (LM).

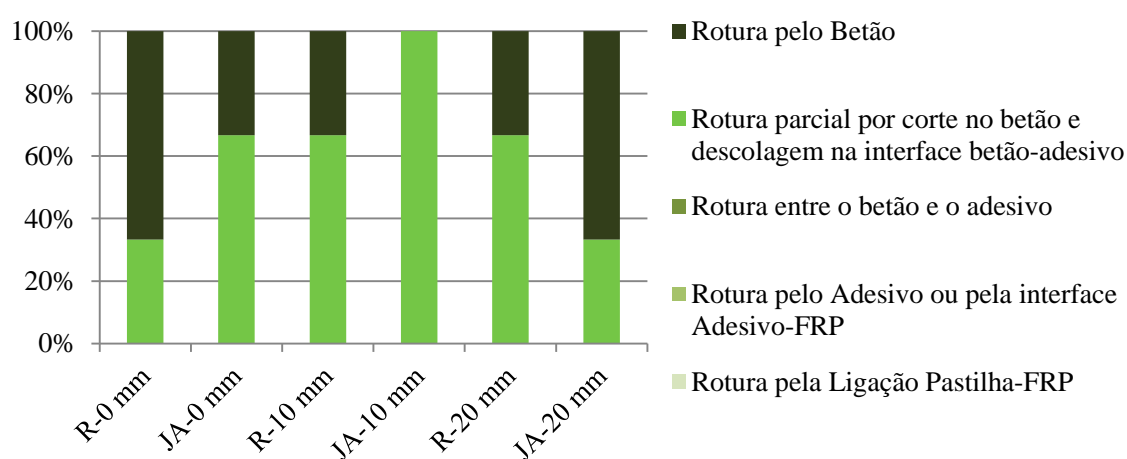


Figura 5.8: Modos de rotura ocorridos na lajeta com agregado grande (LG).

Como visto, nas lajetas com os agregados mais pequenos e com os médios o modo de rotura foi maioritariamente o primeiro; nos maiores, o modo de rotura passou a ser o segundo. Esta mudança deve-se ao facto do agregado apresentar uma superfície lisa, e apesar de nesta lajeta a rugosidade ser maior que nas outras, localmente, onde se encontram agregados grossos expostos, existirá uma zona de contacto agregado-resina que será lisa e por onde ocorrerá o destacamento (Figura 5.9).



Figura 5.9: Superfície de rotura com grande percentagem de agregados lisos.

#### 5.4.2 - Evolução dos ensaios com o envelhecimento

Nas Figura 5.10, Figura 5.11, e Figura 5.12 são apresentadas as evoluções das tensões de arrancamento ao longo do envelhecimento com ciclos de imersão-emersão em água salgada.

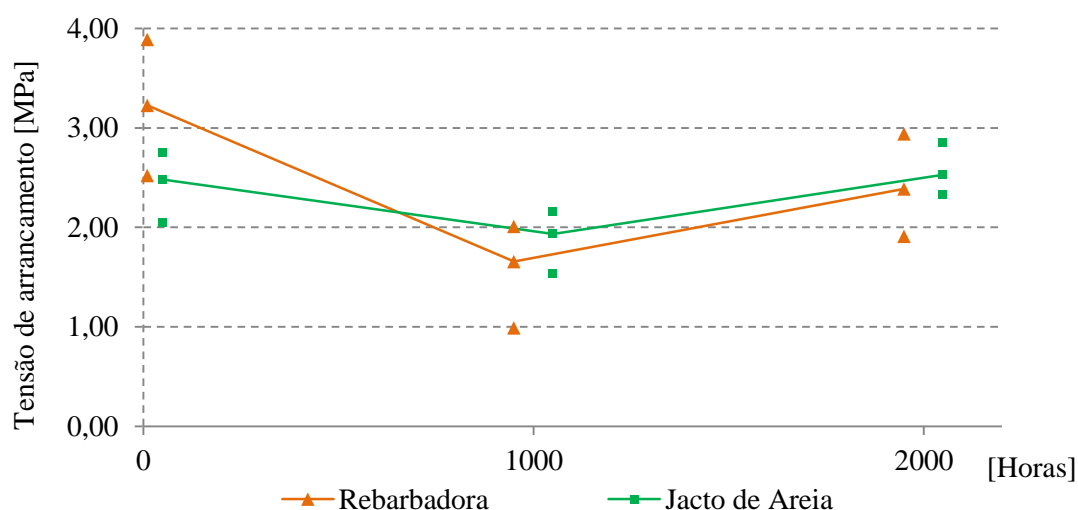


Figura 5.10: Evolução da tensão de arrancamento na lajeta com brita pequena (LP).

Na LP às 1000 horas verifica-se uma diminuição da tensão de rotura tanto para o caso do tratamento com rebarbadora como com jato de areia, acontecimento esperado pelo facto do envelhecimento degradar as propriedades dos materiais, mas também em comparação com os resultados obtidos por outros autores. Ao contrário do que era esperado a tensão de rotura não continuou a diminuir. Os ensaios realizados revelam que existiu um aumento da tensão das 1000 horas para as 2000 horas.

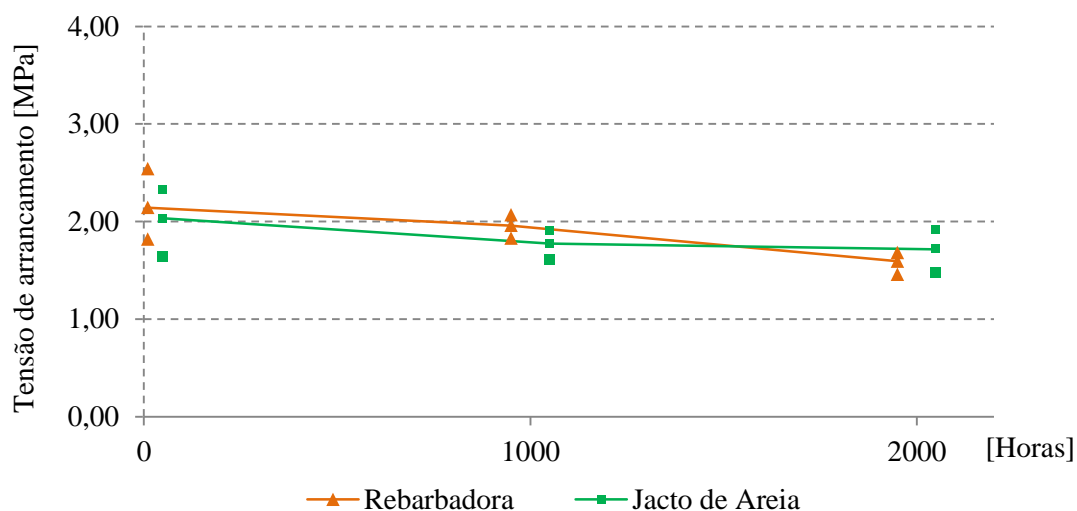


Figura 5.11: Evolução da tensão de arrancamento na lajeta com brita média (LM).

Ao contrário de que aconteceu no caso da lajeta com agregado pequeno, nas outras duas lajetas a tensão de arrancamento foi sempre diminuindo com o envelhecimento, tal como se pode verificar na Figura 5.11 e na Figura 5.12.

Na Figura 5.11 pode observar-se a diminuição da tensão de arrancamento. Das zero horas até às 1000 horas a tensão decresce 0,26 MPa e até às 2000 horas decresce mais 0,05 MPa, perfazendo um total de 0,31 MPa ou seja 12,8%. No caso do tratamento com rebarbadora, a tensão de rotura diminui um total de 0,55 MPa, 25,7%.

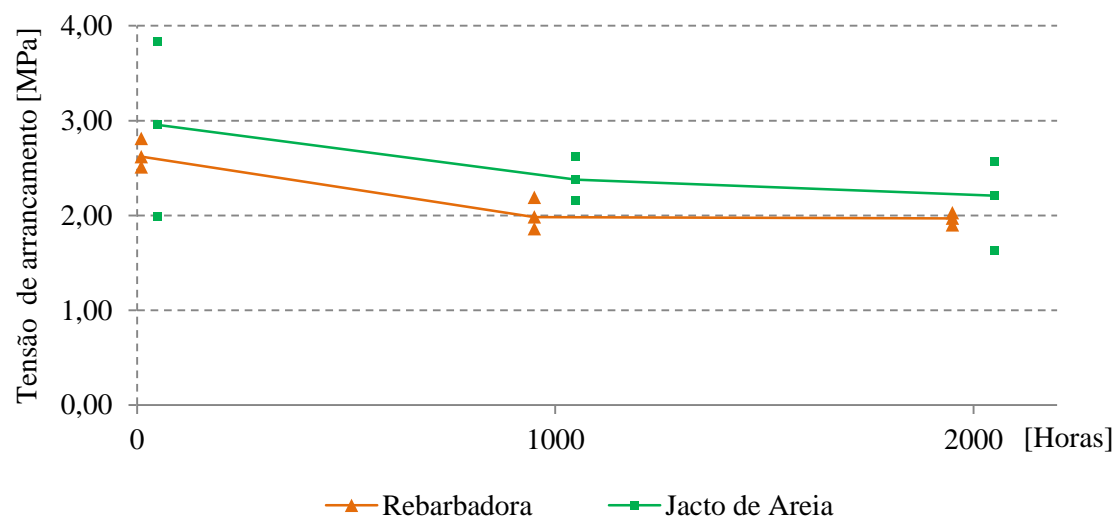


Figura 5.12: Evolução da tensão de arrancamento na lajeta com brita grande (LG).

Na Figura 5.12 pode-se observar a diminuição da tensão de arrancamento correspondente à lajeta com o agregado grande. Desde as zero horas até às 1000 horas a tensão decresce 0,58 MPa e até às 2000 horas decresce mais 0,17 MPa, perfazendo um total de 0,75 MPa ou seja 25,34%. No caso do tratamento com rebarbadora a tensão diminui um total de 0,65 MPa, 24,43%.

Ao longo dos envelhecimentos foram ainda analisados os modos de rotura, não se tendo registado qualquer alteração significativa. Ou seja, nas lajetas LP e LM continuou a registar-se quase na totalidade rotura por modo 1 e na lajeta LG rotura por modo 2.



## Capítulo 6 - Conclusões e Recomendações

No presente capítulo faz-se um resumo das principais conclusões obtidas ao longo deste trabalho e dos principais aspetos a melhorar e a desenvolver no estudo da aderência de laminados compósitos a betão.

No geral, considera-se que os principais objetivos desta dissertação foram atingidos. Com a pesquisa e análise de alguns dos vários ensaios laboratoriais que se podem realizar, ficou aqui resumida uma panóplia de situações que podem facilitar a análise futura de elementos estruturais reforçados com compósitos. Os ensaios laboratoriais realizados acabam por não fornecer respostas objetivas às perguntas levantadas no início desta dissertação, mas fornecem resultados que se enquadram com os obtidos por outros autores, permitindo concluir sobre a adequabilidade dos métodos apresentados à problemática do controlo da aderência de materiais compósitos a superfícies de betão.

Os diferentes tipos de ensaios estudados e analisados neste trabalho apresentam algumas vantagens e desvantagens. O ensaio de arrancamento por tração e o teste de torção são os mais fáceis de executar, os equipamentos são em geral leves e portáteis, permitem obter informação sobre aderência e sobre a perda desta em condições de serviço, os resultados são fáceis de interpretar e todo o processo pode ser realizado em obra. Já o *Peel test*, o ensaio de corte direto e corte duplo necessitam de células de carga e é em laboratório que estes ensaios são mais utilizados.

A aderência do reforço em FRP ao elemento estrutural é um fenómeno complexo, que depende de vários tipos de ligação: ligação química e ligação física. Concluiu-se que o aumento da rugosidade vai ser benéfico para a ligação betão-FRP uma vez que a resina epoxídica vai penetrar pelas irregularidades da superfície e assim criar pequenos sistemas de ancoragem, no entanto esta melhoria é apenas até um certo ponto como explicado de seguida.

Depois de analisados os resultados e as conclusões de alguns dos autores referidos neste trabalho, verifica-se que existem métodos muito agressivos para tratar a superfície, ou que podem ser utilizados de forma muito intensa, e por este motivo podem provocar danos no betão. Existe um patamar onde se deve parar o aumento da rugosidade da superfície, pois a partir desse patamar começará a ocorrer microfissuração no betão o que provocará tensões de arrancamento mais baixas e por consequência o reforço não será totalmente aproveitado.

Também nos ensaios realizados neste trabalho verificou-se uma diminuição das tensões de rotura para a maior rugosidade, obtida com o jato de areia. Concluiu-se que o jato de areia foi utilizado de forma muito intensa tendo introduzido danos no betão superficial. Possivelmente a utilização de forma menos intensa levaria a resultados melhores.

Os modos de rotura obtidos no trabalho laboratorial realizado e nos ensaios obtidos por outros autores que também utilizaram o ensaio de arrancamento direto são essencialmente do tipo modo 1, ou seja arrancamento pelo betão. Sendo assim, se o ensaio por arrancamento direto fornece o valor da tensão para a qual o betão rompe à tração e não para o caso em que o betão se separa da resina epóxi, não é linear obter resultados que apontem concretamente para as melhores superfícies a utilizar ou nível de rugosidade a executar. O ensaio de arrancamento direto não fornece resultados muito precisos, podendo até fornecer resultados muito dispersos. Uma das causas ditas acontecer deve-se ao facto de se solicitar um material não homogéneo, o betão. Tanto se pode estar a ensaiar um carote onde exista uma grande quantidade de pasta de cimento como um carote onde exista uma grande quantidade de agregados ou até vazios, o que leva a resultados que se podem afastar uns dos outros. Este método deve então ser utilizado para verificar se a ligação entre o betão e o compósito está bem executada, (como já é feito em obra, até porque é um método simples de executar), se o modo de rotura obtido for o primeiro, conclui-se que a ligação é melhor que o próprio betão logo vai-se obter o máximo proveito possível do reforço. Deve ainda ter-se atenção ao facto de o reforço com materiais compósitos de FRP aderentes exteriormente ao betão apenas poder ser executado no caso em que a tensão média de arrancamento por tração  $f_{ctm,p} \geq 1,4 - 1,5 \text{ MPa}$  (EN 1542 [27]).

Quanto aos modos de rotura verificou-se que, nos casos em que este ocorria pelo segundo modo, o destacamento ocorria pela superfície do agregado, agregado este de superfície lisa. A utilização de agregado grosso que tenha superfície rugosa poderá fornecer melhores resultados, uma vez que a ligação agregado-resina será reforçada.

A caracterização dos materiais necessita de um estudo mais aprofundado, em especial o betão. Será conveniente, fazer ensaios que visem analisar a ligação entre um material de reforço e uma superfície de betão, bem como a capacidade resistente superficial do betão com a ajuda de um esclerómetro.

A preparação de superfície sendo feita com métodos de impacto elevado pode causar pequenos danos na camada superficial do betão, como por exemplo microfissuras, este facto influenciará de forma negativa o comportamento do reforço, principalmente quando o betão for sujeito a envelhecimentos como o gelo-degelo ou imersão-emersão em soluções alcalinas, pois nesses ambientes as microfissuras tenderão a aumentar. Logo, a caracterização da capacidade resistente superficial do betão deve ser elaborada inicialmente e acompanhada ao longo dos envelhecimentos.

À exceção do que aconteceu na lajeta com agregado pequeno, após realizados os envelhecimentos registou-se uma diminuição da tensão de arrancamento mas manteve-se inalterado o modo de rotura, ou seja, a resistência baixou tanto em roturas por tração do betão como em roturas parciais por corte no betão e descolagem na interface adesivo-betão, levando à conclusão que tanto o betão como o sistema GFRP saíram penalizados do envelhecimento realizado.

A definição de uma relação entre a capacidade resistente à compressão do betão e a rugosidade que se deve conferir à superfície deve ser um tema a abordar pois com esta definição ia-se conseguir obter sempre o máximo proveito dos reforços executados. A obtenção de uma rugosidade teórica deve ser enriquecida com uma relação entre a capacidade resistente à compressão do betão e o tempo que deve ser despendido por cada método de tratamento de superfície de forma a obter-se a rugosidade pretendida.



## Bibliografia

- [1] ACI 546, “*Concrete Repair Guide (ACI 546R-96 (Reapproved 2001))*”, ACI Committee 546, American Concrete Institute, 2001.
- [2] ACI 440, “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Julho, 2000.
- [3] Alimuddin, M.: “*Pell Test for the Evaluation of Environmental Effects on Fiber-Polimer Interface*”, Thesis for the Degree of Master of Applied Science, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, in the University of Toronto, 1999.
- [4] ASTM C 1583-04. “*Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-Off Method)*”. Filadélfia, E.U.A: American Society for Testing and Materials, 2004.
- [5] ASTM D3039: “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*”. American Society for Testing and Materials
- [6] ASTM D4065 – 12: “*Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: Determination and Report of Procedures*”. American Society for Testing and Materials

- [7] ASTM D638: *"Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics"*. American Society for Testing and Materials
- [8] Au, C. and Büyüköztürk, O. *"Peel and Shear Fracture Characterization of Debonding in FRP Planted Concrete Affected by Moisture"*. Journal of Composites for Construction, 2005. p.35-47
- [9] Bank, L.C.: *"Composites for Construction: Structural design with FRP materials"* John Wiley & Sons, 2006.
- [10] Barros, J.: *"Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão – Parte I: Propriedades e técnicas"*. Universidade do Minho, 2004.
- [11] Benzarti K., Quiertant M., Marty C., Chataigner S. e Aubagnac C.: *"Effects of accelerated ageing on the adhesive bond between specimens and external CFRP reinforcements"* , The 5<sup>th</sup> International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Beijing, China, 2010
- [12] Biscaia, H.: *"Rotura por perda de aderência entre reforços poliméricos com fibras de vidro e elementos estruturais de betão"*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2006.
- [13] Bissonnette, B., Nuta, A., Morency, M., Marchand, J. e Vaysburd, A., *"Concrete repair and interfacial bond influence of surface preparation"*, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds) Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-46850-3, Londres, 2009.
- [14] Borges, A.: *"Análise do Comportamento de Juntas de Betonagem"*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008
- [15] CEB-FIP, Fédération Internationale du Béton, *"Model Code 2010 – Final draft"*, Switzerland, September, 2011.
- [16] Chen, W.F. e Liew, R.J.Y. (2003): *"The Civil Engineering Handbook, Second Edition"*. CRC Press.
- [17] Colen I., Brito J. e Branco, F.: *"Avaliação in-situ da aderência de materiais de revestimento"*, 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, Portugal, 2007

- [18] Concrete Society, (2000), “*Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using FRP Composite Materials*”, Technical Report N°55, Crowthome, Berkshire, UK.
- [19] Coutinho, A.: “*Fabrico e Propriedades do Betão*”. 2ª Edição. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1988. ISBN 972-49-0326-5. Vol. 1.
- [20] Coutinho, A.: “*Fabrico e Propriedades do Betão*”. 2ª Edição. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1988. ISBN 972-49-0326-5. Vol. 2.
- [21] Dejke, V. “*Durability and service Life Prediction of GFRP for Concrete Reinforcement*”, Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [22] DER-MG: “*RT 03.25 - Avaliação da macrotextura de pavimentos viários através do ensaio da mancha de areia*”, Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, Fevereiro, 2005.
- [23] Dimande, A.: “*Influência da interface no Reforço à flexão de estruturas de betão com sistemas FRP*”, Departamento de Engenharia Civil Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2003
- [24] E 464: “*Especificação LNEC – Metodologia prescritiva para a vida útil de projeto de 50 anos face às ações ambientais*”. 2005
- [25] Ekenel, M., Myers, J.J., Khataukar, A.L.: “*Affect of environmental conditions during installation process on bond strength between CFRP laminate and concrete substrate*”. In: Third international conference composites in construction (CCC 2005), Lyon, France, July 11–13, 2005. p. 397–404.
- [26] EN 13036-1, “*Road and airfield surface characteristics – Test methods – Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique*”, 2010.
- [27] EN 1542: “*Produts and systems for thr protection and repair of concrete structures – Test methods – Measurements of bond strength by Pull-Off*”.
- [28] Etten, N.: “*Effect of Environment on the Stiffness of Carbon Fiber-Reinforced Polimer (CFRP) Repaired Concrete*”. Thesis presented to the graduate school of the University

- of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Engineering, University of Florida, 2008
- [29] Eurocódigo 2 (EC2), “*Projeto de estruturas de betão – Regras gerais e regras para edifícios*”, EN1992-1-1, Março, 2010.
- [30] EUROCOMP, 1996, “*Structural design of polymer composites –EUROCOMP design code and handbook*”, the European Structural Polymeric Composites Groups, editado por Jonh L, Clarke, E & FN Spon, ISBN 0 419 19450 9, Londres, 710 pp.
- [31] fib bulletin 14, “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*”, Technical Report, 2001
- [32] FYFE Co. LLC: “*Tyfo ® SEH-51 composite using Tyfo ® S Epoxy*”, Dezembro de 2010.
- [33] Galecki, G., Casadei, P., Maerz, N., Nanni, A. and Summers, D. A., “*The Use of High Pressure Water jets in Concrete Substrate Preparation for FRP Applications*”, The Second FIB International Congress, Naples, Italy, June 5-8, 2006, Session 10-88.
- [34] Gomes, A. Clavico, E.: “*Propriedades Físico-Químicas da Água*”, Departamento de Biologia Marinha, Universidade Federal Fluminense, Brasil, 2005.
- [35] <http://civilgeeks.com/wp-content/uploads/2012/07/ESCLEROMETRO-DIGITAL1.jpg>, consultado no dia 20-6-2012.
- [36] <http://portuguese.alibaba.com/product-gs/epoxy-glass-fiber-sheet-314991510.html>, consultado no dia 7-5-2012.
- [37] <http://www.engenhariacivil.com/materiais-compositos-construcao-civil>, consultado no dia 7-5-2012.
- [38] <http://www.engenhariacivil.com/utilizacao-plasticos-reforçados-fibras-construcao>, consultado no dia 5-5-2012.
- [39] <http://www.epotek.com/SSCDocs/whitepapers/Tech%20Paper%2065.pdf>, consultado no dia 08-09-2012.
- [40] <http://www.ftlauderdalesandblastingcontractor.com/>, consultado no dia 2-6-2012.



- [41] <http://www.meteo.pt/pt/oclima/acompanhamento/index.jsp?selTipo=g#>, consultado no dia 30-05-2012.
- [42] <http://www.rocarbon.com/Rocarbon?acao=abririndex>, consultado no dia 5-5-2012.
- [43] Juvandes, L.: “*Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas*”, Departamento de Engenharia Civil Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.
- [44] Juvandes, L.: “*Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP*”, Departamento de Engenharia Civil Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2002.
- [45] Juvandes, L.: “*Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de «CFRP»*”, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1999.
- [46] Juvandes, L Figueiras, J: “*Questões sobre o controlo e a garantia de qualidade dum projeto de reforço com sistemas de CFRP*”, Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, pp 567-578.
- [47] Karbhari, V.M. and Engineer, M. (1996), “*Investigation of Bond Between Concrete and Composites: Use of a Peel Test*” Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 15, February 1996, P208-227
- [48] Lucas, D.: “*Degradação da resistência mecânica de vigas reforçadas com GFRP*”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2006.
- [49] Maerz, H., Chepur, P., Myers, J., Linz, J, “*Concrete Roughness Characterization Using Laser Profilometry for Fiber-Reinforced Polymer Sheet Application*”, Transportation Research Board, 80<sup>th</sup> Annual Meeting, January 7-11, 2001, Washington, D.C., Paper No. 01-0139
- [50] Myers, J.J., Jeffries, J., Shen, X. 2007 “*Effect of Varied Surface Roughness and Concrete Strength on the Bond Performance of FRP Fabrics*”, Proceedings for 2007 Advanced Composites in Construction (ACIC 2007), University of Bath, Bath, England, UK, pp 232-244.
- [51] NP EN 12390-3: “*Norma Portuguesa – Ensaaios do betão endurecido parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*”. 2009.

- [52] NP EN 206-1: “*Norma Portuguesa – Betão parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*”, Junho de 2007.
- [53] Ribeiro, S., Ulrix, E.: “*Aderência entre Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono e o Betão*”, 2000, pp. 705-712
- [54] Rodrigues, C. C.: “*Reparação e Reforço de Estruturas de Betão Armado com Sistemas Compósitos de FRP*”, Centro de Investigação em Estruturas e Construção da UNL, 2005.
- [55] Schwartz, M.M. “*Composite Materials Handbook*”. MacGraw-Hill, EUA, 1984.
- [56] Sen, R., Sukumar, S. e Rosas, J.: “*Durability of CFRP Pretensioned Piles in Marine Environment*”, A report on a Research Project Sponsored by the Florida Department of Transportation in cooperation with the U.S. Department of Transportation, Contract C-4478, Tampa, Florida.
- [57] Specht, L., Rozek, T., Hirsch, F., e Santos, R.: “*Avaliação da macrotextura de pavimentos através do ensaio de mancha de areia*”, Universidade do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº10, Julho, 2007, pp. 30-28.
- [58] Täljsten B., “*Plate Bonding, Strengthening of Existing Concrete Structures with Epoxy Bonded Plates of Steel or Fibre reinforced Plastics*”, Tese de doutoramento, Departamento de engenharia de estruturas, Universidade de tecnologia, Luleå, Suécia, 1994.
- [59] Toutanji, H. e Ortiz, G. (2001): “*The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members*”. Composite Structures, Elsevier, pp. 457-462